



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **KAUKOLÄMMÖN TUOTANNON KEHITYS TULEVAISUUDESSA**

Ville Valima

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Ville Valima

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikka

Kaukolämmön tuotannon kehitys tulevaisuudessa, 2021, 50 sivua

Työn ohjaaja yliopistolla: Pulkkinen Jari, DI

Kaukolämpöverkot ovat Suomessa keskeisessä roolissa energiatehokkaan ja varman lämmityksen ylläpitämiseksi. Kiristyvät energiatehokkuus- ja päästövaatimukset asettavat kaikelle energiantuotannolle selvän suunnan, johon tuotantomenetelmien kokonaisuuden on liikuttava, jonka takia on tärkeää tarkastella etenkin hiilineutraaleita tai päästöttömiä vaihtoehtoja.

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin kaukolämpöjärjestelmiä ja niiden toimintaperiaatteita nykyhetkellä ja tulevaisuudessa. Tutkimuksen pohjana on kirjallisuuskatsaus erilaisiin lämmön tuotantomenetelmiin. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli selvittää nykyisen kaukolämpöjärjestelmän rakenne ja etsiä vaihtoehtoisia tuotanto- ja jakelumenetelmiä. Työssä käytiin läpi kaukolämmityksen nykytilaa tilastojen pohjalta ja kaukolämmityksen kehitystä koskevaa lainsäädäntöä. Työssä tarkastellaan erilaisia lämmön tuotantomuotoja ja perehdyttiin jakelujärjestelmän rakenteeseen. Mukana on myös vaihtoehtoisia tuotantomuotoja, joiden käyttö ei vielä ole laajaa ja arvioidaan näiden menetelmien potentiaalia tulevaisuuden tuotannossa. Tutkimuksen kohteena on vielä tulevaisuuden kaukolämpöverkot, ja millaiseksi ne kehittyvät ominaisuuksiltaan ja organisaatioltaan.

Tavoitteena tutkimuksessa oli saada selville, minkälaisen kaukolämpöverkon voisi muodostaa kirjallisuusselvityksessä löydettyistä tuotanto- ja jakelumenetelmistä, ja millaista sen toiminta olisi. Tärkeimpiä tulevaisuuden lämpöverkon ominaisuuksia ovat tuotantomenetelmien tehostuminen ja monipuolistuminen, varastokapasiteetin nousu ja lämpötilan laskeminen jakeluverkossa sekä kysyntäjousto ja parantunut energiatehokkuus kuluttajapuolella. Tuotantopuolella siirrytään todennäköisesti pois fossiilisista polttoaineista hiilineutraaleihin kuten biomassaan ja muihin kuin polttoon perustuviin tuotantomuotoihin kuten ydinvoimaan tai aurinkoenergiaan. Tämänlaiset

järjestelmät olisivat kestävämpiä ja siten täyttäisivät myös kestävää kehitystä ja hiilineutraaliutta ajavaa lainsäädäntöä. Tulevaisuuden kaukolämpöverkossa tapahtuu mahdollisesti siirtyminen matalalämpöverkostoihin, joiden alempi lämpötila vähentää lämpöhäviöitä siirron aikana. Verkon joustavuus tulee todennäköisesti lisääntymään, kuluttajilla vapaaehtoisien mutta kannustetun kysyntäjoustop kautta ja verkon kannalta kasvaneen varastokapasiteetin takia, jolloin voidaan tasoittaa kysyntähuiput ilman suhteellisesti kalliimpia ja saastuttavampia huippulämpökeskuksia.

Työssä tehtyjä johtopäätöksiä voidaan käyttää suuntaa antavasti kaukolämpöverkon kehityksen suunnittelussa ja päätöksenteossa. Tutkimuksessa esitettyjen tulevaisuuden lämpöverkon piirteiden integroimisella nykylämpöverkkoon voitaisiin saavuttaa huomattavaa energiatehokkuuden kasvamista ja näin vähentää energiantuotantoa saastuttavimmasta päästä.

*Asiasanat: kaukolämmitys, lämmitysjärjestelmät, energiatehokkuus, aurinkolämmitys*

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	5
2 Kaukolämmön nykytilanne .....	7
2.1 Kaukolämmön tuotanto ja kulutus Suomessa .....	7
2.2 Lämmityksen lainsäädäntö ja suunnitelmat .....	10
2.2.1 Energiatehokkuusdirektiivi .....	10
2.2.2 Suomen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma .....	11
2.2.3 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi ja korjausrakentaminen .....	11
3 Katsaus kaukolämmön energialähteisiin .....	13
3.1 Polttoon perustuvat tuotantomenetelmät ja yhteistuotanto .....	13
3.1.1 Höyryturbiini .....	14
3.1.2 Kaasuturbiini .....	15
3.1.3 Puun kaasutus .....	16
3.1.4 Stirling-moottori .....	17
3.2 Lämpöpumput .....	18
3.2.1 Kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate .....	19
3.2.2 Lämmön talteenotto .....	21
3.2.3 Absorptiolämpöpumppu .....	22
3.2.4 Höyryn mekaaninen komprimointi .....	22
3.2.5 Termokompressori .....	23
3.3 Ydinvoima kaukolämmön lähteenä .....	24
3.3.1 Pienet modulaariset ydinreaktorit .....	24
3.4 Aurinkolämpö .....	25
3.4.1 Tasokeräimet .....	26
3.4.2 Tyhjiöputkikeräimet .....	27
3.4.3 Ilmakeräimet .....	27
3.4.4 Keskittävät keräimet .....	28
3.4.5 Aurinkolämmön soveltuvuus Suomessa .....	29
4 Kaukolämmön jakelujärjestelmät .....	30
4.1 Nykyinen 3. sukupolven jakelujärjestelmä .....	30
4.1.1 Jakeluverkoston rakenne .....	30
4.1.2 Virtausputken rakenne .....	31
4.1.3 Lämmönjakokeskus .....	32

4.2 Tulevaisuuden 4. sukupolven jakelujärjestelmä .....	32
4.2.1 Matalalämpöverkosto .....	33
4.2.2 Uusien tuotantomuotojen integrointi kaukolämpöön .....	33
4.2.3 Matala- ja minimienergian rakennus .....	33
4.2.4 Kysyntäjousto .....	34
4.3 Kaukolämmön varastointi .....	35
4.3.1 Lyhytaikaiset varastointimenetelmät .....	35
4.3.2 Kausivarastointi .....	35
5 Pohdinta ja johtopäätökset .....	38
5.1 Miltä näyttää tulevaisuuden kaukolämpöverkko? .....	38
5.1.1 Tuotanto .....	39
5.1.2 Jakelu .....	40
5.1.3 Kulutus .....	40
5.2 Pohdinta .....	41
6 Yhteenveto .....	43

## LÄHDELUETTELO

# 1 JOHDANTO

Maailman alati kiristyvät ilmastotavoitteet asettavat kaikille polttoainetta käyttäville järjestelmille paineita energiantuotannon ja kulutuksen tehostumiseen, ja mahdollisesti ennen pitkään järjestelmän muuttumiseen hiilineutraaliksi tai uusiutuvaksi. Yksi tärkeimmistä kansainvälisistä sopimuksista on Pariisin ilmastopöytäkirja, joka määrittelee maailmanlaajuisen tavoitteen ilmastomuutoksen hidastamiselle ja oikeudellisesti sitovia toimia tähän pääsemiseksi (UNFCCC 2015). Energiatodellisuuden ja ympäristöystävällisyyden suhteen kaukolämmitystä pidetään tehokkaampana vaihtoehtona rakennusten polttoainepohjaiseen keskuslämmitykseen tai sähkölämmitykseen, mutta kaukolämmityksellä on vielä potentiaalia kehittyä. Kaukolämpö on nimetty yhdeksi sadasta avainratkaisusta ilmastomuutoksen hillitsemiseksi (Hawken 2017).

Suomessa lämmityksen energiankulutus on suurta globaalista näkökulmasta viiteen ilmastovuoteen. Kaukolämmityksellä onkin Suomessa pitkät perinteet vallitsevien olosuhteiden suhteen energiatodellisuuden, kokonaistaloudellisuuden ja toimintavarmuuden takia (Mäkelä & Tuunanen 2015). Tärkeä huomio kaukolämmössä on sähkön ja lämmön yhteistuotannon vaikutus voimalaitosten kokonaistodellisuuden ja kannattavuuden parantumiseen. Lämmön talteenotto sähkövoimaloista lisää niiden kokonaisvaltaista energiatodellisuutta siihen nähden, että voimalat tuottaisivat pelkkää sähköä (Laurila & Lauhanen 2011). Suomessa kaukolämpö onkin tärkeässä asemassa energiatodellisuuden lämmityksen ylläpitämiseen.

Työ tarkastelee kaukolämmön nykytilannetta ja sen tekniikkaa, ja pohtii kaukolämmön tulevaisuutta. Työn tutkimuskysymykset ovat:

- Mitä lainsäädäntöä ja ohjeistusta nykyisyyden ja tulevaisuuden kaukolämpöverkoille on?
- Millaisia erilaisia kaukolämmön tuotanto- ja varastointikeinoja on olemassa tai kehitteillä?
- Ja millaista potentiaalia niissä on suhteessa tulevaisuuden vaatimukseen ympäristöystävällisyyden ja energiatodellisuuden suhteen?

- Millaiselta tulevaisuuden kaukolämpöverkot voivat näyttää ja millaisia uusia sovelluksia niihin on odotettavissa?

## **2 KAUKOLÄMMÖN NYKYTILANNE**

Tässä osiossa tarkastellaan kaukolämmön nykytilannetta tilastojen kautta, ja kaukolämmitykseen liittyvää lainsäädäntöä niin EU-tasolla kuin kansallisella tasolla.

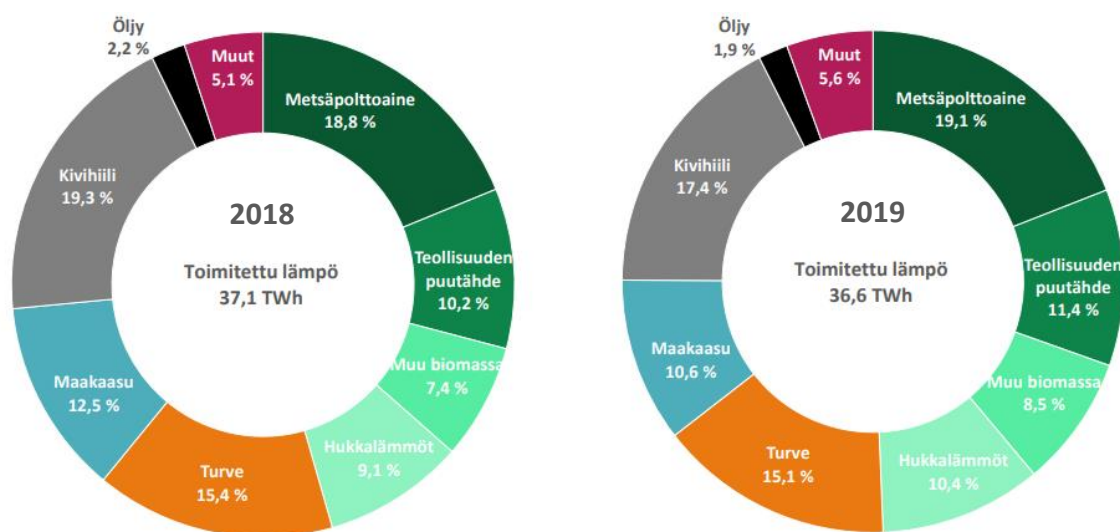
### **2.1 Kaukolämmön tuotanto ja kulutus Suomessa**

Suomessa on vuonna 2019 tuotettu 36 600 GWh lämpöenergiaa 155 500 asiakkaan tarpeisiin. Näistä asiakkaista 80 % oli asuintaloja, 4 % teollisuutta ja 15 % muita asiakkaita. Lämmitetyn tilavuuden suhteen asuintalojen osuus oli 46 %, teollisuuden 14 % ja muiden 40 %. Kaukolämmitetyissä asunnoissa asuu kaiken kaikkiaan 2,94 miljoonaa henkilöä, eli 53 % Suomen väestöstä. Kaukolämmön tuotantoon osallistui 106 voimalaitosta, joiden kaukolämpökapasiteetti oli yhteensä 8 500 MW, sekä 802 lämpökeskusta ja 21 lämpöpumppu/talteenottolaitosta joiden yhteenlaskettu teho oli 14 000 MW. Kaukolämpöverkostoa on Suomessa 15 430 kilometriä. (Energiateollisuus 2020). Kaukolämmön tilastoja tiivistettynä taulukossa 1.



Taulukko 1. Perustietoja Suomen kaukolämmöstä vuonna 2019 ja niiden muutos vuoteen 2018. (Energiateollisuus 2020)

	Vuosi 2019	Muutos vrt. 2018
Kaukolämmön hankinta yhteensä	36 600 GWh	- 1,4 %
Kaukolämmön tuotanto polttoaineilla	32 700 GWh	- 2,9 %
Kaukolämmön tuotantoon liittyvä sähkön tuotanto	11 000 GWh	- 4,4 %
Edellisiin käytetty polttoaine	51 900 GWh	- 3,1 %
Lämmön talteenotto ja lämpöpumpun tuotanto	3 800 GWh	+ 13,9 %
Kaukolämmön käyttö	33 200 GWh	- 0,8 %
Asuintalojen osuus käytöstä	53,6 %	- 0,2 %-yks.
Asiakkaat: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lukumäärä</li> <li>• Sopimusteho</li> <li>• Rakennustilavuus</li> <li>• Asuintalojen osuus rakennustilavuudesta</li> </ul>	155 000 kpl 19 100 MW 1004 milj. m <sup>3</sup> 46,2 %	+ 0,6 % + 0,3 % + 1,1 % + 0,3 %-yks.
Myydyn lämmön verollinen keskihinta: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aritmeettinen keskiarvo</li> <li>• Lämmön myynnillä painotettu keskiarvo</li> </ul>	82,30 €/MWh 80,85 €/MWh	+ 1,1 % + 0,3 %
Kaukolämpöverkon pituus	15 430 km	+ 1,9 %

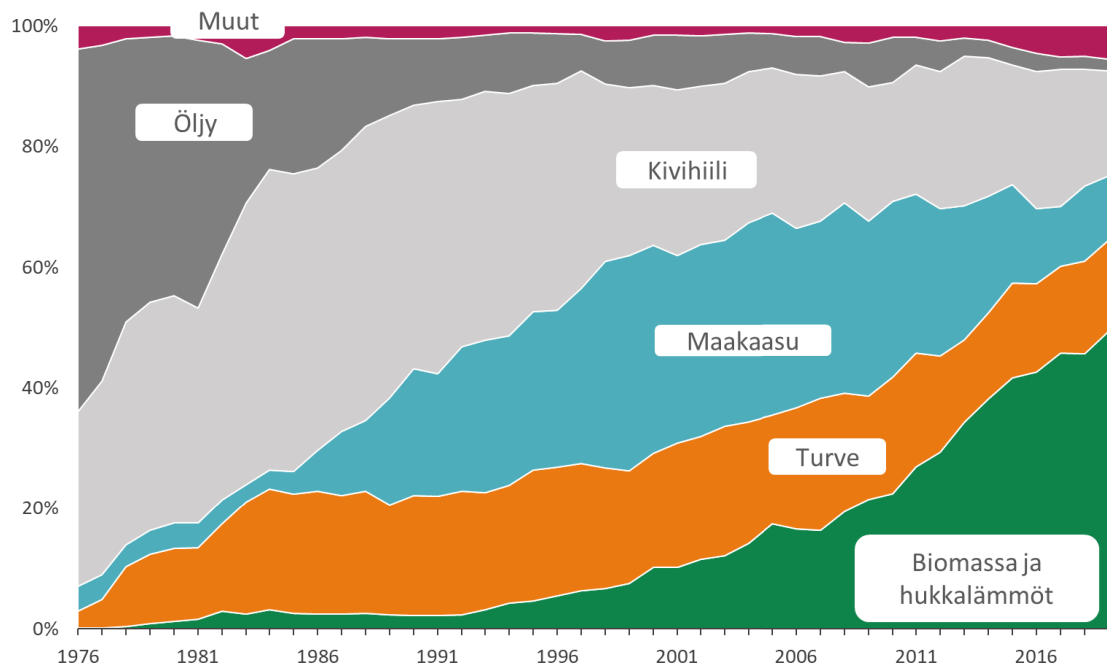


Kuva 1. Kaukolämmön hankinnan energialähteet vuosilta 2018 (vasen) ja 2019 (oikea) (Energiateollisuus 2020)

Vuonna 2019 kaukolämmön kaikesta tuotannosta 39,0 % on tuotettu biomassalla, 17,4 % kivihiilellä, 15,1 % turpeella, 10,6 % maakaasulla, 10,4 % hukkalämmön talteenotolla ja 1,9 % öljyllä. Loput 5,6 % muilla tuotantomuodoilla kuten yhdyskuntien ja teollisuuden muut kuin biojätteet (eritelty sekajäte), ongelmajätteet, sähkö, höyry ja vety. Kuvassa 1 esiteltynä vuosien 2018 ja 2019 jakaumat kaukolämmön tuotantomuodoista. Hiilidioksidineutraalia sähköntuotantoa tästä on 49 % eli uusiutuvat puu- ja biopolttoaineet sekä hukkalämmöt. Kotimaisia energianlähteitä on kokonaisuudesta 70 % ja näiksi luetaan edellä mainitut hiilidioksidineutraalit energianlähteet sekä turve ja osa ”Muut” luokasta. Kaukolämmön hiilidioksidipäästöt ja hinta ovat keskiarvoiltaan 136,6 gCO<sub>2</sub>/kWh ja 8,09 €/snt/kWh. (Energiateollisuus 2020)

Kaukolämmön tuotannosta nopeimmin kasvavia tuotantomuotoja ovat biomassa ja hukkalämmön käyttö, siinä missä fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käyttö on laskussa. Hukkalämmön talteenotto on nopeasti kasvavaa, vuodesta 2014 sen tuotanto on kasvanut noin 1 400 GWh:sta vuoden 2019 3 800 GWh:iin. Tästä talteenotosta 2 650 GWh on siirtimillä talteen otettua savukaasuista, teollisuusprosesseista ja geotermisestä energiasta, 1 190 GWh on lämpöpumpuilla siirrettyä jätevedestä, kaukojäähdytyksen

paluuvdestä ja datakeskuksista. Kaukolämmön hankinnan kehitystä on esitetty Kuvassa 2. (Fortum 2016; Energiategollisuus 2020)



Kuva 2. Kaukolämmön hankinnan energialähteet ja niiden kehitys vuosina 1976–2019 (Energiategollisuus 2020)

## 2.2 Lämmityksen lainsäädäntö ja suunnitelmat

### 2.2.1 Energiategokkuusdirektiivi

Euroopan Unionin energiategokkuusdirektiivi 2012/27/EU (EED) ohjaa energiantuotannon, jakelun ja käytön tehokkuutta ja tehostamista. Energiategokkuusdirektiivin pohjalta on laadittu komission suositus 2019/1659 joka ottaa tarkemmin kantaa lämmityksen ja jäähdytyksen tehostamiseen. Suositus toteaa, että energiategokkuusdirektiivin ja sen tarkennuksien pohjalta tavoitteena on 32,5 % säästöt primäärienergiankulutuksessa unionin tasolla vuoteen 2030 mennessä. Lämmityksen tarpeen suhteen suositus vaatii sen tarpeen yksilöimistä ja ilmoittamista yksityiskohtaisesti energialähteittäin. Lämmön tuotannon suhteen tulee kartoittaa yli 20 MW:n hyödyntämättömiä hukkalämmön lähteitä, etenkin alueilla, joilla on tulevaisuudessa tarvetta lämmitykselle. Esimerkkeinä tällaisista usein

hyödyttämättömistä hukkalämmön lähteistä ovat datakeskukset, ostoskeskukset ja voimaloiden lauhduttimien jäähdytyshöyry. (Euroopan komissio 2019)

Lämmitys ja jäähdytys muodostavat noin 50 % energian kokonaiskysynnästä EU:ssa ja tästä noin 80 % on rakennusten osuus kulutuksesta. Näin ollen pelkällä sähköntuotantomenetelmien uudistamisella olisi tavoitteisiin pääseminen vaikeaa, joten energiatehokkuusdirektiivi koskettaa myös lämmitystä ja sen kehitystä. Lämmityksen kannalta tämä tarkoittaa siirtymistä pois vähemmän energiatehokkaista sähkö- ja polttoainepohjaisista lämmittimistä lämpöpumppuihin tai kaukolämmitykseen. Kaukolämpöverkon on myös muuttava tehokkaammaksi ja tuotantokeinojen on oltava energiatehokkaampia. Kaukolämmityksen laajennusten on oltava energiatehokkaampia kuin edellinen lämmitysmenetelmä, jonka se korvaa. (Euroopan komissio 2019)

### **2.2.2 Suomen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma**

Suomessa on kaukolämmön käyttöönottoa ja CHP:n lämmöntuottopotentiaalia hyödynnetty hyvin. Lähes kaikki usean asunnon rakennukset ja valtaosa julkisista ja kaupallisista rakennuksista ovat jo liitettynä kaukolämpöverkkoon. Lisäksi lähes kaikki kaukolämpöä käyttävät kiinteistöt ovat energiankulutuksen etäluennassa, jolloin EED:n energiankulutuksen tavoitteiden täyttymistä voidaan seurata. (Suomen NEEAP-4 raportti, 2017)

### **2.2.3 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi ja korjausrakentaminen**

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi 2018/844 ohjeistaa hallituksellisia toimia, miten voidaan ohjata uudis- ja korjausrakentamista energiatehokkaammaksi. Tämän pohjalta on Suomessa luotu pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia, joka kuvaa käytännön toimia joilla energiatehokkuuden tavoitteisiin päästään. Uudet rakennukset ovat pääasiassa hyvin energiatehokkaita, sillä rakentamista koskeva ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (1010/2017) ohjaa uudisrakentamista olemaan lähes nollaenergiatalon tasolla, eli energiatehokkaampia kuin vanhat rakennukset. Näin ollen strategia keskittyy vanhojen rakennusten uudistamiseen energiatehokkaammaksi korjausrakentamisen muodossa. Korjausrakentamisen keinoja parantaa rakennusten energiatehokkuutta ovat mm. parannettu automaatio, siirtyminen öljylämmittimistä kaukolämpöön tai lämpöpumppuihin ja kaukolämpöön liitettyjen

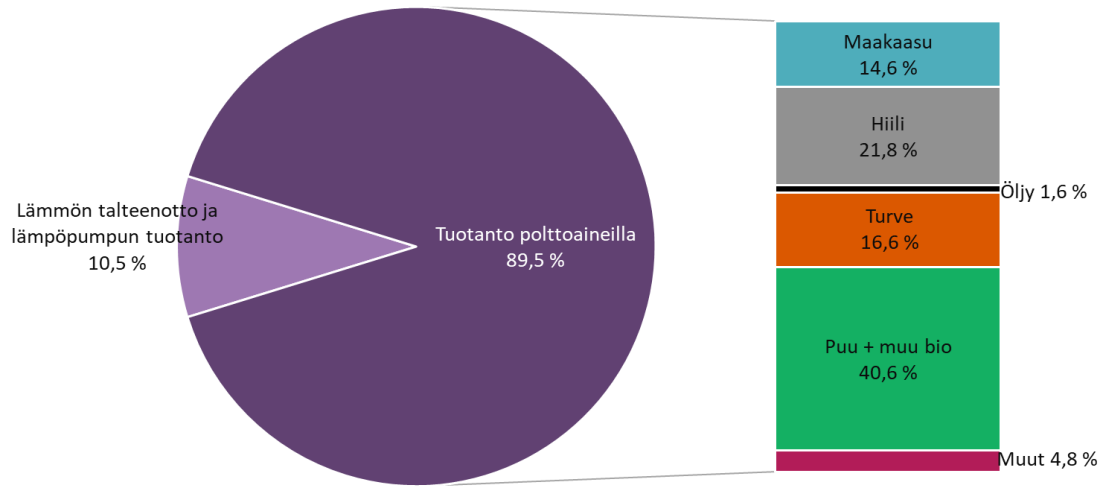
järjestelmien tehostamista poistoilmalämpöpumpuilla. Myös lisäeristämällä ja ikkunoiden uusimisella voidaan kustannustehokkaasti vähentää vanhojen rakennusten lämpöhäviöitä. Huomioitavaa on, että suunnitelma ennustaa lämmitysenergian kokonaiskulutuksen vähenemistä johtuen ilmaston lämpenemisestä, vanhimpien rakennusten käytöstä poistumisesta ja uusien sekä korjattujen rakennusten paremmasta energiatehokkuudesta. (Euroopan komissio 2019; Ympäristöministeriö 2020)

### **3 KATSAUS KAUKOLÄMMÖN ENERGIALÄHTEISIIN**

Tässä kappaleessa esitellään erilaiset kaukolämmön tuotantomuodot ja energianlähteet, alkaen polttoon perustuvasta sähkön ja lämmönyhteistuotannosta ja niiden erilaisista tekniikoista sekä erilaisista lämpöpumppu tekniikoista. Näitä täydennetään tarkastelemalla uudempiä vaihtoehtoja kuten ydinvoimaa ja aurinkolämpöä kaukolämmön lähteinä.

#### **3.1 Polttoon perustuvat tuotantomenetelmät ja yhteistuotanto**

Polttoon perustuvat lämmönlähteet muodostavat valtaosan, 89,5 %, kaukolämmön energialähteistä Suomessa. Tarkempi jakauma kaukolämmön tuotannossa käytetyistä polttoaineista on esitetty Kuvassa 3. Kaikesta kaukolämmön tuotannosta Suomessa vuonna 2019 on 67 % tuotettu sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa (Combined Heat and Power, CHP) (Energiateollisuus 2020). CHP-laitosten etuna pelkkään sähkön tai lämmön erillistuotantoon pohjautuviin laitoksiin on hyvä primäärienergiankäytön tehokkuus yhdistettynä taloudelliseen kannattavuuteen. Yhteistuotanto on erityisen hyödyllinen tuotantotapa kylmissä ilmastoissa kuten Suomessa, joissa sekä sähkölle että lämmölle on kysyntää. (Laurila & Lauhanen 2011)

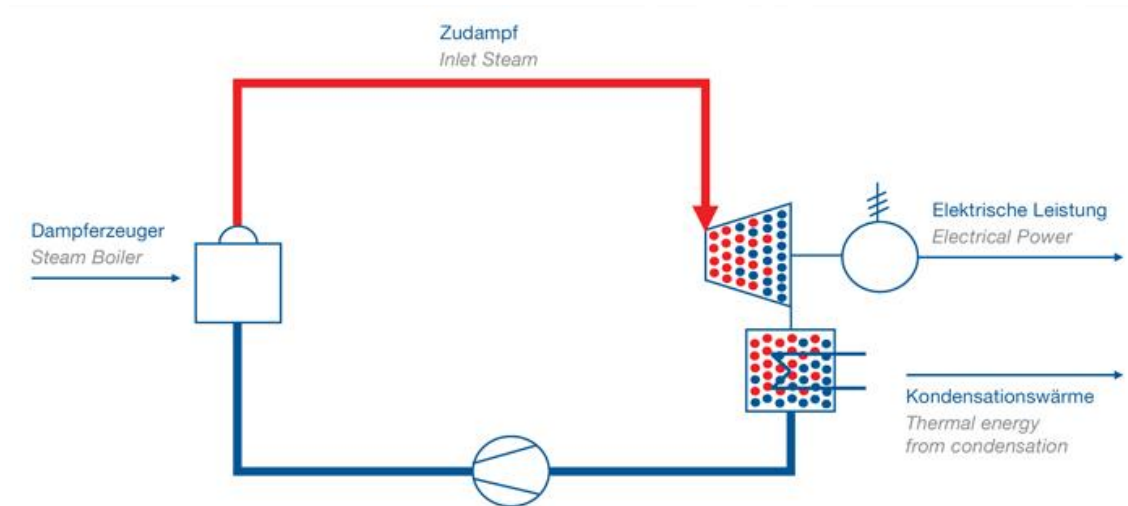


Kuva 3. Polttoaineiden osuus kaukolämmön tuotannosta (Energiateollisuus 2020)

### 3.1.1 Höryturbiini

Yleisin yhteistuotannon tapa on höryturbiinilaitos. Tuotanto lähtee käyntiin polttoaineesta, joka voi olla kiinteää ainetta kuten hiiltä, turvetta tai puuta, nestettä kuten öljyä, tai kaasua kuten maakaasua tai puusta pyrolysoitua kaasua. Kaasua tai nestettä poltetaan aineelle soveltuvalla suuttimella ja kiinteille polttoaineilla on monia eri polttoainetyypeille sopivia polttoratkaisuja kuten leijukerros poltto, arinapoltto tai pölypoltto. Polttoaineen palaminen tulipesässä saa höyrykattilassa olevan veden kiehumaan, josta syntyvä höyry johdetaan vielä tulistimiin. Tulistimet kuumentavat höyryä vielä entisestään 450–550 °C loppulämpötilaan joko tulipesän kuumuuden tai sen ulostulossa olevien kuumien savukaasujen avulla. Tulistettu vesihöyry siirretään turbiiniin, jossa sen paisumisen aikaansaama liike-energia muutetaan roottorin avulla generaattoria ajavaksi pyörimisenergiaksi ja edelleen sähköksi. Turbiinin jälkeinen matalaenergisempi höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se luovuttaa loput lämmöstä kaukolämmöksi hyödynnettäväksi ja tiivistyy vedeksi. Vesi palautetaan takaisin höyrykattilaan joko luonnollisen paine-eron tai pumpun avulla. Höryturbiinilaitoksen

kokoluokka on tyypillisesti megawattiluokkaa. Kuvassa 4 on esitetty vesi-höyrypiirin kierto. (Kärenlampi 2017: Laurila & Lauhanen 2011)



Kuva 4. Vesi-höyrypiirin lauhdediagrammi (Sondex 2021)

ORC-prosessi (Organic Rankine Cycle) on muunnos höyryturbiinista. Siinä kiertoaineena toimii veden sijaan orgaaninen neste kuten öljy, joka pienemmän höyrystymislämmön ansiosta toimii matalammassa lämpötilassa kuin vesi. Tämä mahdollistaa paljon pienemmät mittakaavat ja vähäisemmän hyötysuhteen tippumisen, jos laitetta ei voida käyttää täydellä teholla. ORC-prosessin kokoluokka on välillä 200–1500 kW. (Karjalainen 2012)

### 3.1.2 Kaasuturbiini

Kaasuturbiineissa höyryturbiinista poiketen ohitetaan kokonaan veden kierto ja polttoaine poltetaan polttokammiossa, josta palokaasut johdetaan suoraan turbiiniin. Turbiini pyörittää generaattorin lisäksi myös ennen polttokammiota olevaa kompressoria, joka ahtaa ilmaa polttoprosessille. Turbiinista poistuva palokaasu on vielä hyvin kuumaa, noin 450–550 °C, joten se voidaan johtaa rekuperaattoriin, jossa kaasuturbiiniin menevä ilma esilämmitetään, jonka jälkeen voidaan kaasusta vielä ottaa talteen lämpöä. Yhteistuotannossa kaasuturbiinin kokonaishyötysuhde saadaan 75–85 prosenttiin. Kaasuturbiinit ovat myös hyvin skaalautuvia, niiden kokoluokka vaihtelee 25 kilowatin



mikroturbiineista jopa kymmenien megawattien teollisuusturbiineihin. (Karjalainen 2012)

### 3.1.3 Puun kaasutus

Kaasutuksessa puusta tehdään polttokelpoista kaasua kuumentamalla se korkeisiin lämpötiloihin, jolloin siitä erilaisten kemiallisten reaktioiden seurauksena vapautuu synteesikaasua, jonka tärkeimmät komponentit ovat vety ja hiilimonoksidi. Kaasuuntuminen on nelivaiheinen prosessi (Koivuluoma 2018; All Power Labs 2012):

1. Kuivumisvaiheessa kosteus poistuu raaka-aineesta. Tämä vaihe on energiaa vievä, joten kuivemmat raaka-aineet hukkaavat vähemmän energiaa veden haihtumisen muodossa.
2. Pyrolyysivaiheessa tapahtuu kaasujen muodostuminen. Pyrolyysi suoritetaan kuumassa (500-1500 °C) ja vähähappisessa tilassa, jolloin syntyy hiilimonoksidia.
3. Pyrolyysia seuraa hapetusvaihe, joka tuottaa energian muihin vaiheisiin. Prosessiin päästetään ilmaa, jolloin hapen lisäys aiheuttaa palamisreaktion raaka-aineessa.
4. Pelkistysvaihe on kaasuuntumisen viimeinen askel ja päinvastainen kuin hapetusvaihe. Siinä raaka-aineessa oleva edellisen vaiheen kuumuudesta punahehkuinen hiili pelkistää hiilidioksidia hiilimonoksidiksi ja vesihöyryä vedyksi.

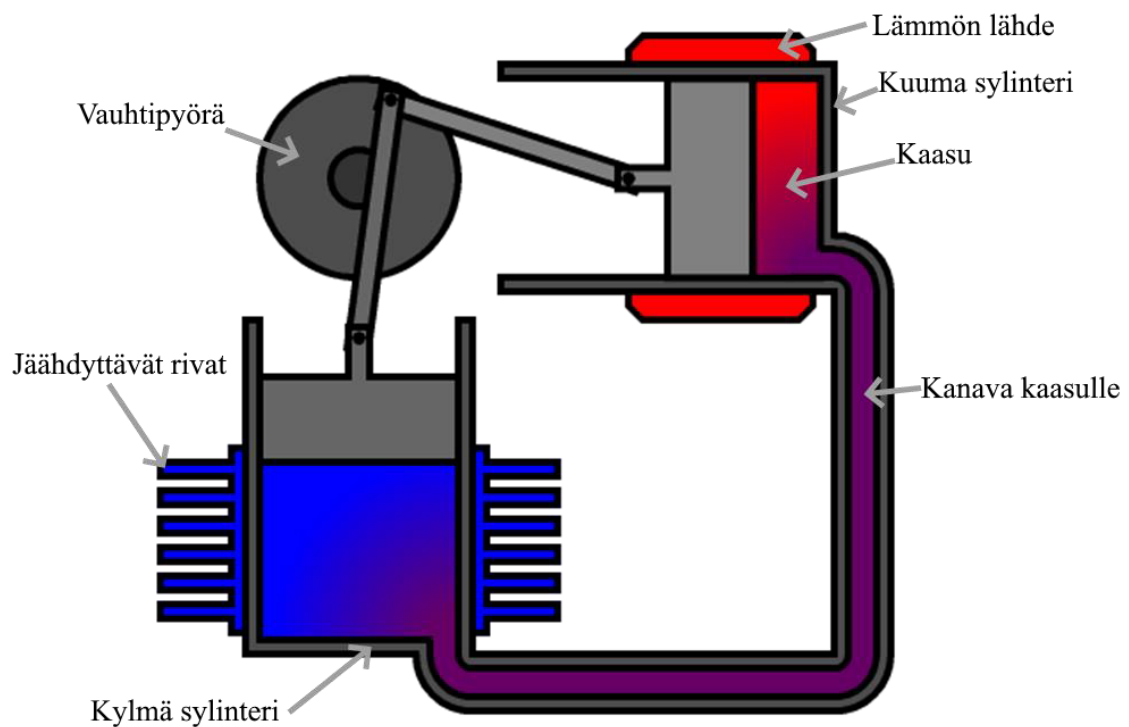
Syntynyt suurimmaksi osaksi hiilimonoksidia ja vetyä oleva kaasus on nyt epäpuhtauksien suodatuksen jälkeen käyttökelpoista mäntäpolttomootorissa, höyrykattilassa tai kaasuturbiinissa, jonka jälkeen voidaan lämmön talteenotto tehdä kullekin tuotantomuodolle ominaisella tavalla. (Koivuluoma 2018; All Power Labs 2012)

Puun kaasutusta pidetään erittäin potentiaalisena pienen kokoluokan 10-1000 kW CHP-laitoksen teknologiana. Polttoaine on hyvin yksinkertaisesti metsähaketta tai muuta metsäteollisuuden sivutuotetta tai mahdollisesti muuta biomassaa. Pyrolyysikaasua voisi käyttää kokoluokan mukaan sille parhaiten sopivalla polttotekniikalla, mikä mahdollistaa kohtuullisen laajan skaalautuvuuden tekniikalle ainakin kaasun käyttöpuolella.

Keskeisenä ongelmana puun kaasutuksessa on kaasun sekä prosessin mekaaninen puhtaus. Kaasun sisältämät tervayhdisteet ovat alttiita tukkimaan putkistoja ilman kaasun tarkkaa jatkokäsittelyä. Kaasuttimen puolella raaka-aineet jättävät jälkeensä tuhkaa ja tervaa, jotka täytyy säännöllisesti poistaa. Lisäksi kaasuttimessa on riski prosessin ylikuumenemiselle, jolloin muodostuu typen oksideja tai jopa kaasuttimen sulaminen. Näiden ongelmien vuoksi yksittäisen kaasuttimen kokoa ei voida skaalata loputtomasti ylöspäin. (Karjalainen 2012)

### **3.1.4 Stirling-moottori**

Stirling-moottori tekee liike-energiaa pelkästään lämpöenergiasta ja lämpötilaerosta. Moottorissa kuumenevan kaasun laajeneminen ja toisella puolella kylmenevän kaasun kutistuminen tuottaa syklisen liikkeen, joka ajaa mäntäparia. Vaikka toimintaperiaatteet pysyvät samana niin mäntien mekaanisia kokoonpanoja on erilaisia, esimerkiksi Kuvassa 5 esitetty alfa-tyyppi, yhdessä sylinterissä molemmat männät sisältävä beta-tyyppi, tai tämän muunnos gamma-tyyppi. Stirling-moottorin käyttövoimana toimii mikä tahansa lämmönlähde sillä männät ovat suljettu systeemi, jossa ei tapahdu palamista tai muutakaan kemiallista reaktiota. (Karjalainen 2012)



Kuva 5. Alfa-tyypin Stirling-moottorin kokoonpano (mukaiillen Wheeler 200)

Stirling-moottori on helppo liittää näennäisesti mihin tahansa lämmönlähteeseen tehden tästä pienimuotoisen yhteistuotantolaitteen, mutta kokoluokka moottoreilla on varsin pieni, vain 2-20 kilowattia. (Karjalainen 2012)

### 3.2 Lämpöpumput

Lämpöpumput siirtävät lämpöä kylmästä ympäristöstä lämpimään ympäristöön. Lämpöpumput ovat luonteeltaan enemmän energian talteenotto- ja siirtokeino kuin tuotantokeino, sillä ne vaativat lähteen, josta ottaa lämpöä. Energiatehokkuudeltaan kotitalouksien ilmalämpöpumput ovat selkeä kilpailija kaukolämmölle. Toisin kuin yksinkertaisempi sähkövastuslämmitin, lämpöpumppu tuottaa suuremman määrän lämpöenergiaa kuin mitä se kuluttaa sähköenergiana. Tämä suhde tunnetaan nimellä lämpökerroin (COP, Coefficient Of Performance). Siinä missä sähkölämmittimen COP on aina 1, eli yksi watti kulutettua sähköenergiaa tuottaa yhden watin lämpöä, voi lämpöpumppu saada paljon korkeampia arvoja riippuen siirrettävien puolien lämpötilaerosta. Lämpöpumpun COP ja tehokkuus on käänteisesti verrannollinen kylmän ja kuuman puolen väliseen lämpötilaeroon, eli eron kasvaessa siirretty lämpömäärä

vähenee. Suurin teoreettinen mahdollinen COP arvo saadaan yhtälöstä 1. (Hautala & Peltonen 2016; Motiva 2008)

$$\text{COP} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (1)$$

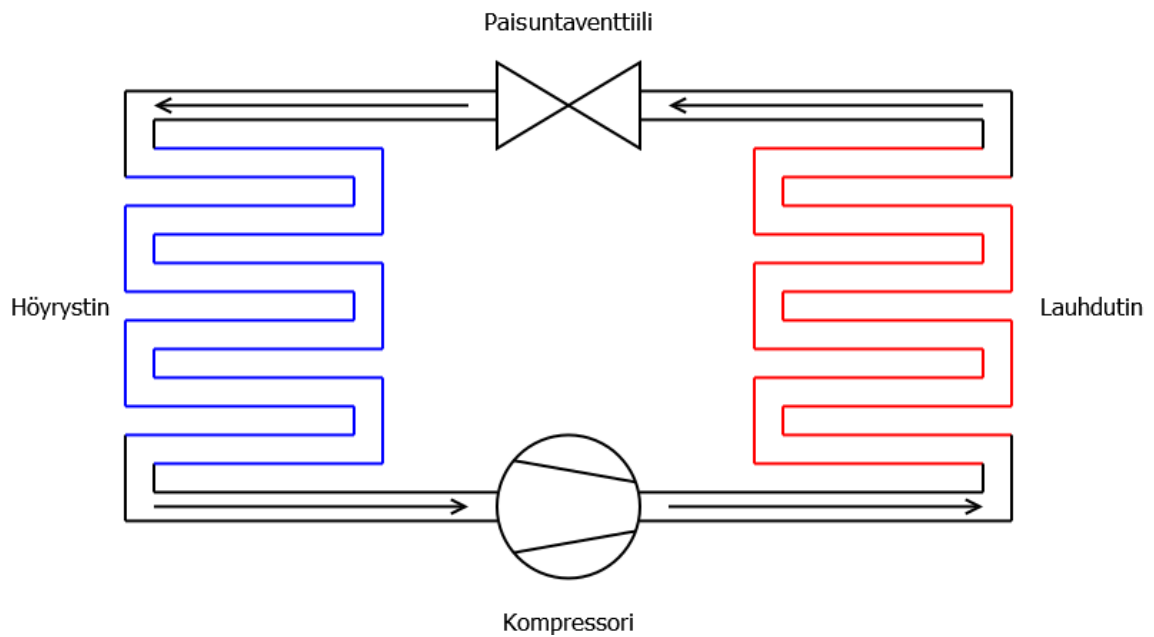
missä COP on lämpökerroin,  
 $T_H$  on kuuman puolen lämpötila [K],  
 $T_C$  on kylmän puolen lämpötila [K]

Esimerkiksi siirrettäessä  $-5\text{ °C}$  lämpöisestä ulkoilmasta lämpöä  $+21\text{ °C}$  asteiseen sisäilmaan ilmalämpöpumpulla saadaan yhtälön 1 avulla laskettua lämpöpumpun COP-arvo:

$$\text{COP} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{294\text{ K}}{294\text{ K} - 268\text{ K}} = 11,3$$

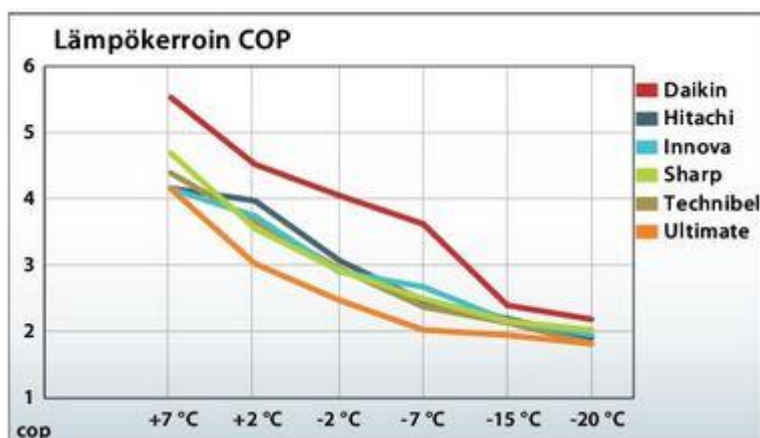
### 3.2.1 Kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate

Tyypillisin lämpöpumppu on kompressorilämpöpumppu, joka on suljettu järjestelmä, jossa kiertää olomuotoa muuttava kylmäaine. Kuvassa 6 on esitetty kompressorilämpöpumpun rakennekaavio. Lämpöpumpun kompressorin puristaa kaasumaista kylmäainetta lauhduttimeen, jonka korkeassa paineessa kylmäaine tiivistyy nesteeksi ja vapauttaa energiaa. Paisuntaventtiili eli kuristin säännöstelee kylmäaineen virtausta lauhduttimen puolelle niin että siellä on kompressorin imun vaikutuksesta matalapaine. Höyrystimen matalassa paineessa nestemäinen kylmäaine höyrystyy ja sitoo energiaa ympäristöstään. Höyrystimestä kompressorin puristaa kylmäaineen lauhduttimeen. Koska lämpöpumpun toimintaperiaate on sama mutta käänteinen kuin tavanomaisten kylmälaiteiden, voidaan virtaussuunta kääntämällä muuttaa lämpöpumppu ilmastointilaitteeksi. Tämä on etenkin kotitalouksille hyödyllistä, sillä sama laite voi pitää talvisin sisäilman lämpimänä ja kesäisin viileänä. (Motiva 2008)



Kuva 6. Kompressorilämpöpumpun rakenne

Ulkoilmasta lämpöä ottavan lämpöpumpun heikkoutena on sään mukaan vaihteleva lämpökerroin. Pakkasten ja lämmitystarpeen ollessa kovimmillaan on ulkoilmasta siirretty lämpömäärä pienimmillään. Tosin kovimmillakin pakkasilla on lämpöpumpun teoreettinen COP moninkertaisesti parempi kuin sähkölämmittimen 1, esimerkiksi  $-30\text{ °C}$  pakkasella  $+21\text{ °C}$  asteisen sisäilman ylläpitämiseen COP saa teoreettisesti yhtälöstä 1 arvon 5,8. Käytännössä COP arvot ovat huomattavasti heikompia kuin teoreettiset maksimit. Kuvassa 7 on esiteltyä eri laitevalmistajien lämpöpumppujen todellisia arvoja ulkoilman lämpötilan perusteella. On silti huomattava, että  $-20\text{ °C}$  pakkasella lämpöpumpun COP 2 tarkoittaa että saman lämpömäärän tuottamiseen lämpöpumppu käyttää puolet energiasta sähkölämmittimeen verrattuna. (Motiva 2008; Lindell 2011)



Kuva 7. Ulkoilmalämpöpumppujen mitattuja lämpökertoimia lämpötilan suhteen (Lindell 2011)

### 3.2.2 Lämmön talteenotto

Koska kotitalouksissa ulkoilmalämpöpumpun lämpökerroin laskee huomattavasti ulkoilman ollessa kylmää, saadaan lämpöpumppujen hyötysuhdetta huomattavasti kasvatettua keräämällä lämpöä keskitetysti jostain mistä se muuten menisi hukkaan. Teollisuudessa huomattavia lämmön talteenoton kohteita ovat savukaasut, prosessikaasut, poistohöyry, jäte- ja jäähdytysvedet, koneellisen jäähdytyksen lauhde ja kuivurien poistokaasut. Prosesseista kerätty lämpö voidaan käyttää uudelleen tehtaan omaan kulutukseen joko osana prosesseja tai kiinteistöjen lämmitystä, tai myydä kaukolämpöverkkoon. Siinä missä ylijäämälämmöt ovat sellaisenaan liian viileitä suoraan hyödynnettäviksi, alle 55-asteisia, voidaan lämpöpumpun avulla hyödyntää kylmiäkin, alle 10-asteisia virtoja. (Motiva 2014)

Teollisuudessa voidaan soveltaa myös muunlaisia lämpöpumppuja kuin kompressorilämpöpumppua, riippuen saatavilla olevasta lämmön lähteestä ja lämmön sovellettavasta kohteesta. Kompressorilämpöpumppu soveltuu lämmön talteenottoon tehtaan sisäisesti muun muassa kuivauksen yhteydessä. Tällöin poistoilmasta kerättävä lämpö siirretään korvausilmaan, mikä parantaa huomattavasti kuivauksen energiatehokkuutta. Kompressorilämpöpumppu soveltuu myös kaukolämmön tuottamiseen viileistä ylijäämävirroista. (Motiva 2014)

### 3.2.3 Absorptiolämpöpumppu

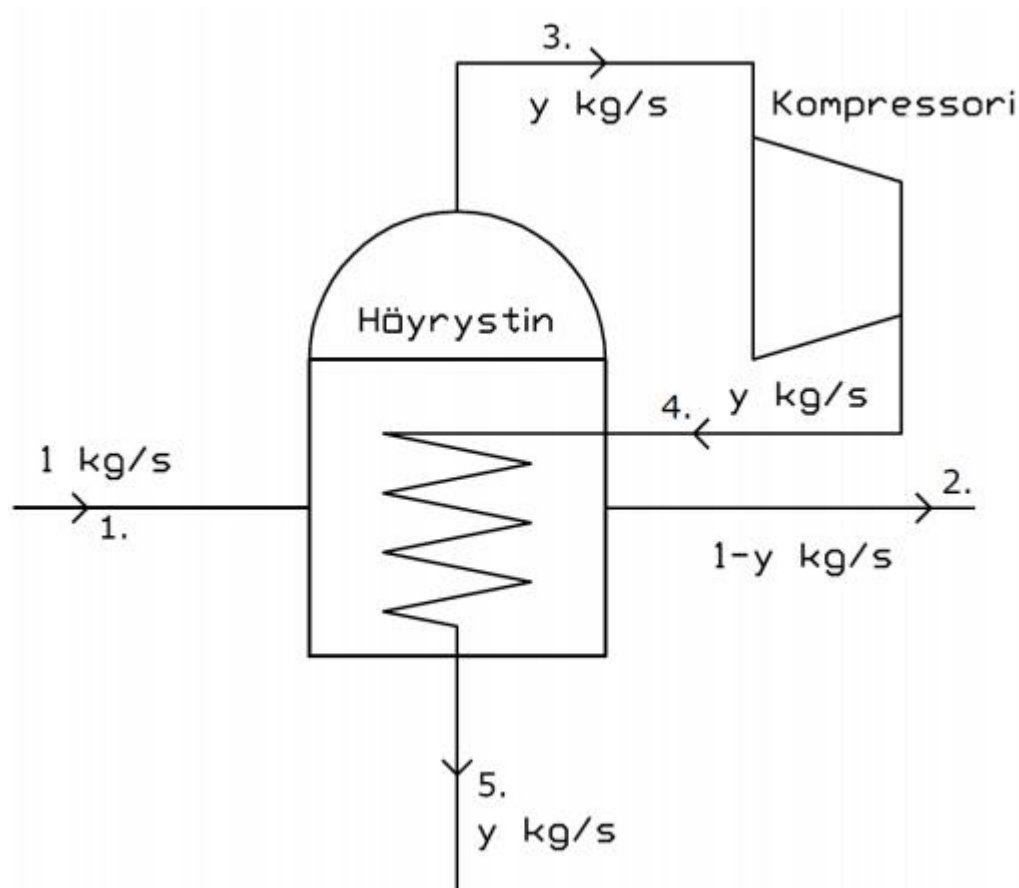
Absorptiolämpöpumppu on teollisuuteen soveltuva lämpöpumpputyyppejä. Teoreettisesti kuvailtuna se on yhdistetty lämpöpumppu ja lämpövoimakone, jossa kerättävällä hukkalämmöllä käytetään lämpövoimakoneetta, joka jäähdyttää yhtä virtaa ja lämmittää toista. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaatteena ovat sorptioprosessit, joita on kolmenlaista. Ensimmäinen on absorptio, eli kaasun liukeneminen nesteeseen, toinen adsorptio eli kaasun tai nesteen sitoutuminen huokoisen aineen pintaan, ja viimeinen on desorptio eli kaasun vapautuminen kiinteästä aineesta tai nesteestä. Absorptio ja adsorptio ovat lämpöä vapauttavia prosesseja kuten tiivistyminen, desorptio lämpöä sitova prosessi kuten höyrystyminen. Absorptiopumpussa käytetään ainepareja, joita sekoitetaan ja erotellaan lämpötilan ja paineen muutoksilla; näin saadaan kompressorilämpöpumpulle analogisia energiaa sitovia ja vapauttavia olomuodon muutoksia. (Koljonen & Sipilä 1998)

Absorptiolämpöpumput ovat kookkaita ja monimutkaisempia kuin kompressorilämpöpumput. Niiden COP on matala 1,5–1,8. Absorptiolämpöpumput saavat tosin melkein kaiken toimintaenergiansa hyödynnettävistä hukkalämmöistä, jolloin sähköä ei tarvitse kuin nesteen kierrättämiseen laitteistossa, mikä on eduksi, jos saatavilla oleva lämpöenergia on huomattavasti halvempaa kuin sähköenergian tuonti. Absorptiopumput myös soveltuvat hyvin jäädytykseen sekä ovat luotettavia ja vähän huoltoa kaipaavia. (Motiva 2014)

### 3.2.4 Höyryn mekaaninen komprimointi

Höyryn mekaaninen komprimointi on kemianteollisuudessa perinteinen tapa nostaa veden energiatasoa. Kuvassa 8 esitelty esimerkki yksinkertaisesta mekaanisesta komprimoinnista. Mekaanisessa komprimoinnissa vettä johdetaan höyrystimeen, jossa osa vedestä höyrystyy ja johdetaan kompressorille. Kompressorin nostaa höyryn painetta ja johtaa sen höyrystimeen, jossa höyry luovuttaa energiaa veteen höyrystimen läpi. Mekaaninen komprimointi saa kaiken tarvittavan energiansa kompressorin tekemästä työstä. Ylijäämä höyry voidaan komprimoida uudestaan eri kiertoaineella, jos lämpötilan nousu ei ole vielä riittävä hyödynnettäväksi. Komprimoinnille on ominaista hyvin korkeat

COP arvot, jopa 30, ja jopa 90 % energiansäästöt primäärienergian käytössä. (Maaskola ja Kataikko 2014, Luoranen 2017 mukaan; Motiva 2014)



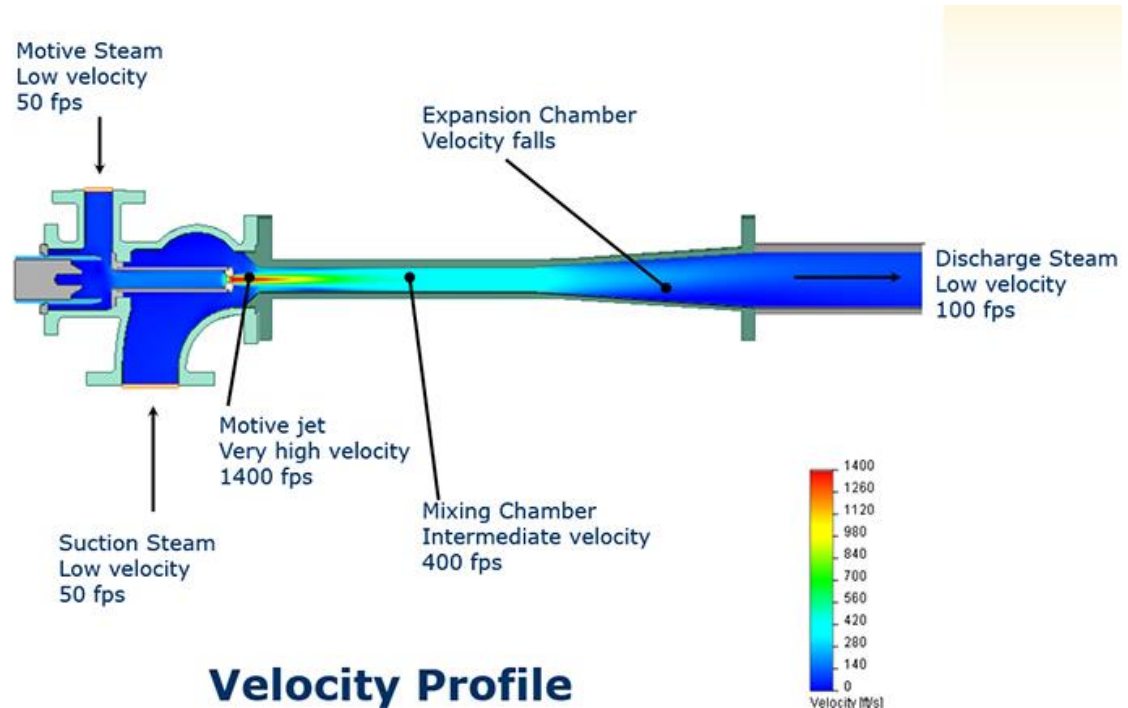
Kuva 8. Höyryn mekaaninen komprimointi (Luoranen 2017)

### 3.2.5 Termokompressori

Termokompressori nostaa matalaenergiaisen höyryn energiatasoa korkeampipaineisen höyryn avulla. Vaikka termokompressori kuluttaa korkeapaineista ja kuumaa höyryä toimintaansa, mahdollistaa se käytetyn matalaenergisien höyryn uudelleenkäytön. Termokompressori on mekaanisesti yksinkertainen laite, Kuvassa 9 on esitettyä sen rakenne ja siinä kulkevan höyryn nopeusjakauma. Korkeampipaineinen höyry johdetaan suuttimeen, joka on liitetty matalapaineisemman höyryn syöttöön. Korkeapaineinen höyry puristaa ja sekoittuu matalapaineiseen höyryyn suuttimen jälkeisessä sekoituskammiossa. Sekoituskammioista ulos tuleva höyry on korkeammassa paineessa kuin sinne syötettävä matalapaineinen höyry. Termokompressorin COP arvo on mekaanista komprimointia matalampi, 1,5–5, mutta termokompressori ei vaadi



sähköenergiaa toimintaansa, ja on rakenteellisen yksinkertaisuutensa vuoksi edullisempi. (Maaskola ja Kataikko 2014, Luoranen 2017 mukaan; Motiva 2014)



Kuva 9. Termokompressorin rakenne ja nopeuskaavio (Bernhard 2019)

### 3.3 Ydinvoima kaukolämmön lähteenä

#### 3.3.1 Pienet modulaariset ydinreaktorit

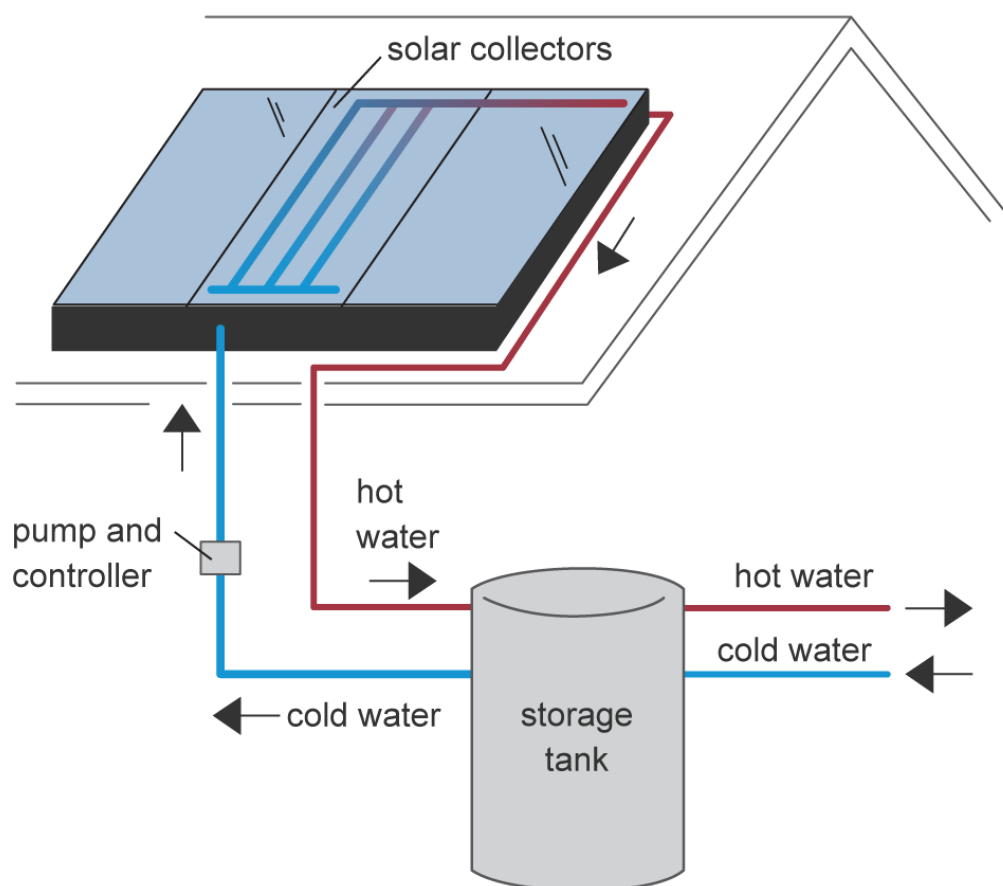
Ydinvoimaa on hiljattain kaavailtu kaukolämmön lähteenä korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Erityisesti kiinnostuksen kohteena ovat pienet modulaariset ydinreaktorit (SMR – Small Modular Reactor), alle 300 MW teholtaan olevat reaktorit, joiden rakentamis- ja käyttöönottoprosessit voisi virtaviivaistaa, verrattuna nykyisiin suurien laitosten vastaaviin prosesseihin. Koska SMR:ien ja toiminnasta poistettavien hiilivoimaloiden tehoskaalat ovat varsin samanlaiset, niin on olemassa mahdollisuus muuttaa entiset hiilivoimalat ydinvoimaloiksi sijoittamalla reaktorit tyhjäksi jäävään laitokseen. Näin voitaisiin minimoida rakennettavan lisäinfrastruktuurin tarve laitoksen ulkopuolella. (World Nuclear Association 2020)

Keskeisimpänä etuna SMR:issä on reaktorin koon vähentyessä myös reaktorin riskien väheneminen. Pienikokoisessa reaktorissa on pinta-alan suhde isompi tilavuuteen jolloin reaktorilla on mahdollisuus passiivisesti jäähdyttää itseään niin riittävästi ettei onnettomuuden sattuessa sähkön katkeamaton saanti ole välttämätöntä. Pieni koko myös mahdollistaa reaktorin sijoittamisen maan tai veden alle, jolloin riski luonnon aiheuttamilta katastrofeilta kuten tsunamilta, hirmumyrskyiltä ja maanjäristyksiltä on huomattavasti pienempi. Reaktori olisi näin suojassa myös ihmisen toiminnan aiheuttamilta vaaratilanteilta kuten lento-onnettomuuksilta. Reaktorin osien säädellyllä sarjatuotannolla on myös todennäköisesti positiivinen vaikutus niiden laatuun ja ennen kaikkea reaktorin tuotantokustannuksiin. Reaktorin saapuessa elinkaarensa päähän myös sen käytöstä poistaminen on huomattavasti helpompaa koska reaktori voidaan kuljettaa purku- tai loppusijoituspaikalle kokonaisuudessaan. Tällainen siirrettävyys myös mahdollistaa reaktorin sijoittamisen lähemmäs asuinalueita, jolloin energian kuljettamisesta johtuva häviöt vähenevät huomattavasti. (World Nuclear Association 2020)

### **3.4 Aurinkolämpö**

Aurinkolämpö muuttaa auringon säteilyenergiaa kiertoaineen avulla kuumaksi vedeksi, jota voidaan käyttää suoraan kulutuskohteessa, tai syöttää lämmönvaraajaan. Aurinkolämpöjärjestelmä koostuu energian keräävästä aurinkokeräimestä, kuuman veden varastoivasta lämmönvaraajasta, kiertoa ylläpitävästä pumpusta, nämä kaikki silmukaksi liittävästä putkistosta ja siinä virtaavassa lämmönkeruunesteestä sekä mahdollisesti näiden kaikkien tilaa valvovista antureista ja ohjainyksiköstä. Keräintyyppejä on useanlaisia, ja ne voidaan karkeasti jakaa ei-keskittäviin sekä keskittäviin keräimiin. Järjestelmän perusrakenne on esitetty Kuvassa 10. (Pekkala 2018)

## Basic components of a solar water heating system



Note: This is a simplified diagram of a drainback-type solar water heating system.  
Source: U.S. Energy Information Administration



Kuva 10. Aurinkokeräinjärjestelmän rakenne (U.S. Energy Information Administration 2020)

### 3.4.1 Tasokeräimet

Tasokeräimet ovat elementtirakenteisia kokonaisuuksia, jotka koostuvat läpinäkyvästä katteesta, säteilyenergian keräävästä absorptiolevystä, lämmön kuljettavasta liittymisputkista, säteilyn vielä takaisin keräinosioon heijastavasta taustapeilistä, eristeestä ja rakenteellisista karmeista. Keräinelementtien koko vaihtelee kotitalouksiin asennettavista 2–4 m<sup>2</sup> elementeistä noin 10 m<sup>2</sup> lämpöverkkoihin tai maatilalle liitettäviin suurkeräimiin. Keräimet valmistetaan tyypillisesti metalleista näiden korkean

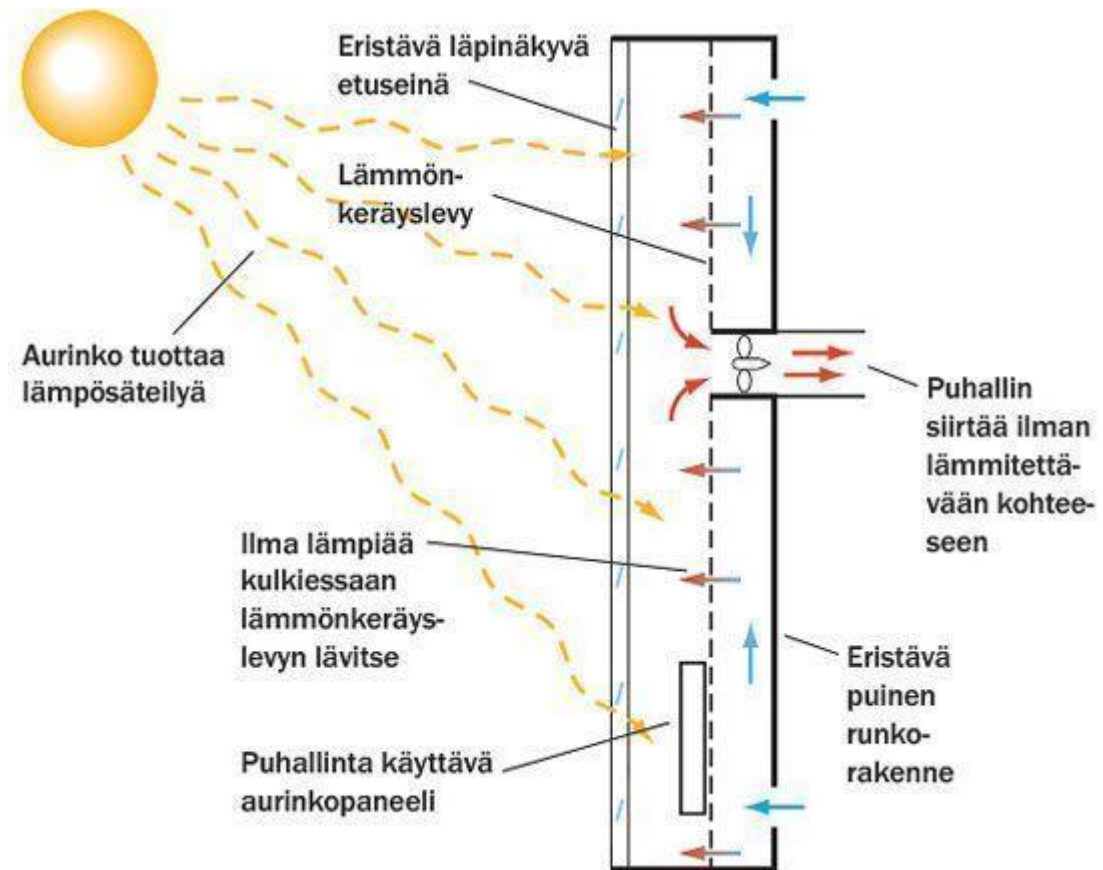
lämmönkestävyyden vuoksi, mutta myös kuumuutta kestäviä muoveja voidaan käyttää yksinkertaisemmissa malleissa. Metallisissa keräimissä oleva kate on yleensä lämmönvaiheluita kestävää erikoislasiä, joka myös päästää valtaosan siihen paistavasta auringonsäteilystä. (Pekkala 2018)

### **3.4.2 Tyhjiöputkikeräimet**

Tasokeräintä monimutkaisempi tyhjiöputkikeräin eristää energiaa keräävät lämpöputket onton tyhjiöidyn lasiputken sisälle. Seurauksena tyhjiön eristysominaisuuksista, voi lämpötila nousta tyhjiöputkien sisällä hyvin korkeaksi, jopa 250 °C vaikka ulkolämpötila olisi hyvinkin alhainen. Tyhjiöputkikeräimiä on virtausrakenteeltaan kahden tyyppisiä; tasokeräimen kaltaisia läpivirtausperiaatteella toimivia ja muodoltaan koeputkea muistuttavia lämpöputkia, joissa neste kertyy putken alapäähän, jossa se höyrystyy säteilyn voimasta ja kuljettaa energian lämmönsiirtimeen. (Pekkala 2018)

### **3.4.3 Ilmakeräimet**

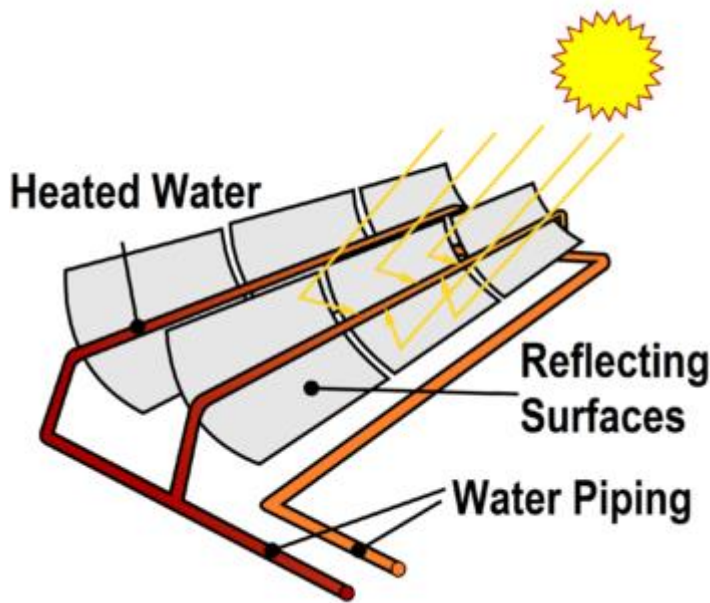
Ilmakeräimet ovat vähemmät tarkoitukseen tehtyjä jälkikäteen asennettavia elementtejä ja enemmän passiivista lämmitystä tuottavia rakennusmenetelmiä. Niissä lämmön siirtoaineena toimii nesteen sijaan ilma, jolloin tehokkuus pienenee, mutta niin myös huolto-, rakennus- ja turvallisuuskustannukset nesteisiin liittyvien korroosio ja ylikuumenemisongelmien poistuessa. Kuvassa 11 on esitetty ilmakeräimen rakenne. Ilmakeräimessä viileä huoneilma johdetaan rakennuksen auringon puoleisella seinällä olevaan läpinäkyvään kammioon, jossa sen virtausta hidastetaan ja se lämpenee auringon säteilyn vaikutuksesta. Lämmennyt ilma imetään puhaltimilla takaisin huoneistoon. Ilmakeräimien kapasiteetti on matala, eivätkä ne sovellu hyvin käyttöveden, saati kaukolämpöveden lämmittämiseen. (Pekkala 2018)



Kuva 11. Ilmakeräimen rakenne (Motiva 2020a)

#### 3.4.4 Keskittävät keräimet

Keskittävät keräimet käyttävät parabolisia peilejä kohdistamaan moninkertaisen pinta-alan auringon säteilyä yhteen putkeen kuten Kuvassa 12 (Line Focus Collector) tai yhteen pisteeseen (Point Focus Collector). Nämä voivat tuottaa äärimmäisen kuumia, jopa tuhannen asteen lämpötiloja. Keskittävien keräimien käyttäjiä ovat pääasiassa energiaa tuottavat aurinkolämpövoimalaitokset, eivätkä ne ole yleisiä lämmityskäytössä. Keskittävät keräimet vaativat moottoroidun peilin, jotta peilin polttopiste pysyy kuumennettavan kohteen päällä koko päivän ajan. (Hanania ym. 2018)



Kuva 12. Putkeen keskittävän keräimen rakenne (Hanania ym. 2018)

#### 3.4.5 Aurinkolämmön soveltuvuus Suomessa

Aurinkolämmöllä on Suomessa laajan hyödyntämisen kannalla suuria haasteita. Suomen pohjoinen sijainti johtaa voimakkaaseen kausivaihteluun auringon säteilyn saannissa, jolloin suurin osa vuotuisesta säteilystä saadaan maaliskuun ja syyskuun välillä, milloin lämmityksen tarve on vähäistä. Vastaavasti talvikuukausina, jolloin lämmityksen tarve on suurinta, on päivänvalon määrä vähäisimmillään. Lisäksi talvikuukausina keräimien päälle kertyvä lumi estää auringon säteilyn läpäiseminen ja rakenteellisesti kuormittaa keräinelementtejä, mikä myös tarkoittaa, että paneelit tarvitsevat suurimman määrän huoltoa aikana jona niiden tuottama lämpö on vähäisintä. Kovien pakkasten vaara myös vaatii keruunesteen pakkaskestävyyttä jäätymisen estämiseksi, mikä esimerkiksi käytettäessä glykolia jäänestoaineena vesiseoksessa lisää sen viskositeettia ja virtausvastusta sekä vähentää sen lämpökapasiteettia. Pohjoinen sijainti maapallolla myös tarkoittaa säteilyn matalaa tulokulmaa, jolloin säteilyn intensiteetti on vähäisempää ja maaston tai rakennuksien varjostama pinta-ala suurempaa. (Pekkala 2018)

Ratkaisuna näihin ongelmiin on aurinkolämmön kausivarastointi, josta on kirjoitettu lisää kappaleessa 4.3.2.

## 4 KAUKOLÄMMÖN JAKELUJÄRJESTELMÄT

Tämä osio tarkastelee nykyaikaista jakelujärjestelmää niiden rakenteiden ja lämmönjakokeskusten kautta, jakelujärjestelmän kehittymistä tulevaisuudessa ja verkostoon liitettävien varastojen tekniikkaa.

### 4.1 Nykyinen 3. sukupolven jakelujärjestelmä

Jakelujärjestelmä on kaukolämmön kallein osa sen laajuudesta ja rakennusvaatimuksista johtuen. Järjestelmän suunnittelu on laaja kokonaisuus, jossa tulee ottaa huomioon niin nykyinen, että tulevaisuuden yhdyskuntatekniikka, mitoitus, kaavoitus ja kaupunkisuunnittelu. Kattavan suunnittelun ja huomattavien rakennuskustannuksien jälkeen lopputuloksena on verkosta, jonka käyttöikä on vähintään 30-50 vuotta ja parhaimmillaan jopa 70-100 vuotta. Vuonna 2019 kaukolämpöverkon toimintavarmuus kaikki keskeytyksien syyt huomioon ottaen oli 99,978 %, mikä tarkoittaa noin 1,9 tunnin keskeytysaikaa asiakasta kohden. (Energiateollisuus 2020; Mäkelä & Tuunanen 2015)

#### 4.1.1 Jakeluverkoston rakenne

Kaukolämpöverkostossa vesi virtaus on yksisuuntaista, joten linjat ovat pari meno- ja paluuputkia. Putket sijoitetaan yleensä maan alle, mutta joissain tapauksissa kaukolämpölinjoja voidaan myös viedä rakennusten läpi, maan päällä, tai yhdistettynä siltoihin. Nykyinen kaukolämmön jakeluverkoston kokonaisuus tuottajien ja käyttäjien välillä koostuu kuumaa vettä jakelevista siirtojohdoista, runkojohdoista ja talojohdoista sekä näiden toimintaa ohjaavista verkostovarusteista, joita ovat välipumppaamot, venttiilit ja mittauslaitteet. Siirtojohdot yhdistävät lämmöntuotantolaitokset runkojohtoihin ja eri lämmitysalueet toisiinsa. Runkojohdot jakavat kaukolämpöveden pienemmille alueille, joista talojohdot yhdistävät yksittäiset asiakkaat kaukolämpöverkkoon. Asiakkaalla sijaitseva lämmönjakelukeskus huolehtii tämän yksilöllisestä kaukolämpötehontarpeesta. Olennaisena osana verkoston tehokasta toimintaa ovat välipumppaamot ja huippulämpökeskukset, jolloin verkoston painetta ja lämpötilaa saadaan säädettyä optimaalisesti aina senhetkisen lämmönkulutuksen ja virtaaman mukaan. (Mäkelä & Tuunanen 2015)

#### 4.1.2 Virtausputken rakenne

Nykyisin valtaosa kaukolämpöputkista ovat Mpuk- ja 2Mpuk-virtausputkia, joiden rakenne on esitetty Kuvassa 13. Ne ovat polyeteenisellä muovikuorella suojattuja (M) polyuretaanilla eristettyjä (pu) kiinnivaahdotettuja (k) teräksisiä virtausputkia. Kiinnivaahdotus estää putkien lämpöliikettä sillä kokemukset lämpöliikkeiden sallimisesta putkien sisällä Mpul-tyypissä ovat todenneet putkityypin olleen vaurioherkkä. Mpul-tyypin putkessa sisällä oleva lasikuituputki erottaa teräsputken polyuretaanieristeestä ja mahdollistaa putken lämpöliikkeen. Mpuk-rakenteessa sekä meno- että paluuputki ovat saman suojarakenteen sisällä, 2Mpuk-rakenteessa ne ovat eri suoja-kuorien sisällä, jolloin niiden rakennus suoritetaan pareittain. Molemmat rakenteet ovat yleensä tehdasvalmisteisia elementtikokonaisuuksia, joihin on saatavilla myös muunnokset muiksi verkon osiksi kuten haaroituksiksi, venttiileiksi tai lämpöliikettä kompensoiviksi paljetasaimiksi. Suomalaisessa kaukolämmössä putkiston suunnittelulämpötila on 120 °C ja maksimipaine 1,6 MPa. Jäähdyttämällä käytetään runko- ja jakelujohdoissa 45-55 °C lämpötila-eroa, siirtojohdoissa 30-40 °C (Mäkelä & Tuunanen 2015)



Kuva 13. 2Mpuk-lämmönjakeluputken loppupää ja läpyleikkaus käytöstä poistettavasta Mpul-putken suoja- ja eristyskerroksesta. (Mäkelä & Tuunanen 2015)



### **4.1.3 Lämmönjakokeskus**

Suomalainen kaukolämpöjärjestelmä perustuu asiakaslähtöiseen tehon ottoon jakeluverkosta, jolloin asiakas tyydyttää kulloisenkin lämmön tarpeen verkosta ja lämmön tuotanto joustaa täyttämään nämä tarpeet. Avaimena järjestelmän vakaaseen toimimiseen ovat asiakkaalla olevat automatisoidut lämmönjakokeskukset. (Mäkelä & Tuunanen 2015)

Lämmönjakokeskus yhdistää korkeapaineisen ja kuuman kaukolämpöverkon rakennuksen sisäisiin lämmitysjärjestelmiin lämmönsiirtimillä, jolloin kuitenkin molempien järjestelmien vedet pysyvät erillään. Näin asiakas itse voi määrittää haluamansa tehonoton verkosta ja asiakkaalla tapahtuvat lämmitysjärjestelmän vahingot eivät leviä muuhun verkkoon, ja vesivahinkojen laajuus on pienempi ja helposti hallinnassa oleva pienemmän suljetun verkon myötä. (Mäkelä & Tuunanen 2015)

Lämmönjakokeskus on lämmönsiirtimistä, säätölaitteista, pumpuista ja muista laitteista muodostuva elektronisten ja mekaanisten laitteiden kokonaisuus, joka on mitoitettu rakennuskohtaisesti. Parhaiten toimivassa lämpökeskuksessa on jokaiselle samat lämpötilat ja toiminta-ajat omistavalle lämpöpiirille oma lämmönsiirrin, jolloin erilaisten kysyntöjen seurauksena tehtävät kompromissit vähenevät. Tehokkaassa lämmönjakokeskuksen ja rakennuksen lämmityksen toiminnassa on avaimena jokaisen rakennuksen sisäisen lämmönjakelun osion huolellinen suunnittelu ja mitoitus aina kaukolämpöverkkoon liitettävän lämmönsiirtimeen tehosta yksittäisten huoneiden lämpöpatterien kokoon. (Mäkelä & Tuunanen 2015)

## **4.2 Tulevaisuuden 4. sukupolven jakelujärjestelmä**

Suunnitellussa neljännen sukupolven kaukolämpöverkossa yhdistyy matalalämpöinen (30-70 °C) lämmönjakeluverkko, uusiutuvat energianlähteet, lämmön varastointi ja älykäs verkoston säätely. Nämä yhdessä muodostavan järjestelmän, joka on tehokas ja ympäristön suhteen kestävä. Monet neljännen sukupolven käytännöistä ovat jo rajatusti käytössä nykyisissä kaukolämpöjärjestelmissä, mikä tarkoittaa, että neljännen sukupolven kaukolämpöverkko on vähemmän spekuloitujen tulevaisuuden

teknologioiden odottelua ja enemmän vanhan heikkotehoisen infrastruktuurin korvaamisella moderneilla energiatehokkailla ratkaisilla. (Lund ym. 2014)

#### **4.2.1 Matalalämpöverkosto**

Matalalämpöverkosto on keskeisessä roolissa tulevaisuuden kaukolämpöverkostoissa. Lämpötilan pudottaminen 50 °C menolämpötilaan ja 20 °C paluulämpötilaan vähentää huomattavasti lämpöhäviöitä lämpötilaeron ympäristöön ollessa alhaisempi. Matalampi lämpötila myös mahdollistaa korkeamman tehokkuuden CHP-laitoksissa, lämpöpumpuissa, savukaasujen lämmön talteen otossa ja avaa uusia tuotantomuotoja matalalämpöisistä prosesseista teollisuudesta, maalämmöstä ja aurinkolämmöstä. Lisäksi matalalämpöverkko tehostaa lämpövarastojen varastokapasiteettia, mikäli varaston lämpötila voidaan nostaa jakeluverkon lämpötilan yläpuolelle. (Lund ym. 2014)

#### **4.2.2 Uusien tuotantomuotojen integrointi kaukolämpöön**

Uuden sukupolven matalalämpöverkoston alempi lämpötila ja nykytilanteeseen nähden suuri lämmön varastointikapasiteetti mahdollistaa alhaisempien hukkalämpöjen hyödyntämisen ja vain osan ajasta saatavilla olevien energianlähteiden käyttämisen kuten tuulivoiman huipputuotannon varastoinnin ja aurinkolämmön käytön kausivarastojen avulla. Näin kaukolämmön saatavuus lisääntyy, vaikka uuden tuotannon rakentaminen olisikin vähäistä uusien lämmönlähteiden tullessa käyttökelpoisiksi. Monimuotoiset energianlähteet tuovat kaukolämpöverkkoon hajautettua tuotantoa, jolloin tuotannon häiriötilanteiden vaikutus vähenee ja järjestelmän toimintavarmuus kasvaa, etenkin kun lyhytaikaiset tuotannon puutteet voidaan tasata varastoista tai muista joustavista tuotantoratkaisuista. (Lund ym. 2014)

#### **4.2.3 Matala- ja minimienergian rakennus**

Energian tuotannon tehostaminen kanssa energian kulutuksen tehostaminen on olennainen tavoite tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmissä. Uudet eristysratkaisut, ilmanvaihdon tehostus ja älykkäät sekä kohdistetut lämmitysjärjestelmät vähentävät hukkalämpöjen määrää ja näin lämmityksen energian kulutusta. Vähäisempi energian kulutus myös vapauttaa olemassa olevaa tuotantoa muuhun käyttöön; samalla tuotantokapasiteetilla voidaan lämmittää enemmän matalaenergiataloja kuin

vanhanaikaisia taloja, säästetty lämpö voidaan käyttää teollisuuden tuotantoon, tai vähennetyllä energiankulutuksella voidaan karsia saastuttavimpia tuotantolähteitä pois verkosta ylimääräisinä. (Lund ym. 2014)

#### 4.2.4 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustossa asiakkaan energian kokonaiskulutusta ei vähennetä, vaan energian ottoa muutetaan aikaan jolloin se on tuottajalle taloudellisempaa ja tehokkaampaa. Ilman minkäänlaista kysyntäjoustoa on kaukolämmön kulutus vuorokausitasolla epätasaista; aamulla ja iltapäivällä on lämmön kysynnässä suuret huiput. Tämä tarkoittaa että kysynnän tyydyttämiseksi on tuottajan puolella oltava huippulämpökeskuksia, jotka usein ovat saastuttavampia ja vähemmän tehokkaita kuin muut lämmön tuotannon menetelmät, tai tuottajan on tehtävä suuria investointeja varastointikapasiteetin lisäämiseksi verkkoon. (Energiateollisuus 2015)

Kysyntäjoustolla voidaan vähentää kalliimman ja saastuttavamman huipputuotannon tarvetta. Kysyntäjoustoon osallistuva asiakas voi esimerkiksi automatisoinnin avulla ladata lämmönvaraajansa yöllä, jolloin aamuhuipun aikana talouden ei tarvitse ottaa lämpöä verkosta, tai sen määrä on huomattavasti vähäisempi. Aamun aikana käytetty lämpö voidaan taas päivän vähäisemmän kulutuksen aikana varata uudelleen illan kulutusta varten. Näin kulutushuiput loivenevat ja kalliiden mutta joustavien tuotantotapojen kuten öljykattiloiden tarve vähenee. Kysyntäjouston voi myös toteuttaa antamalla rakennusten sisälämpötilan vaihdella enemmän. Tällöin voidaan rakennuksen lämpötilaa ennen huippua nostaa esim. +2 °C tavallisesta ja alkaa lämmittämään rakennusta lämpötilan laskettua 2 °C alle tavallisen +21 °C kulutushuipun jälkeen. Kulutushuippujen aikana lämpötila olisi riippuvainen sisäilmaan ja rakenteisiin varastoituneesta lämmöstä. Tällainen kysyntäjousto laskisi asumismukavuutta, mutta voisi säästää jopa 25 % huipun hetkisestä lämmitystehosta. Kannustimena mukavuuden laskulle on tyypillisesti edullisempi hinnoittelu kysyntäjoustoon osallistujille. (Energiateollisuus 2015)

### 4.3 Kaukolämmön varastointi

Kuten edellisessä kappaleessa on todettu, lämmön varastoinnilla on olennainen rooli tulevaisuuden kaukolämpöverkoissa ja tiettyjen tuotantomenetelmien tukemisessa. Lämmön varastointimenetelmät voi kaukolämmön näkökulmasta jakaa lyhytaikaisiin varastointikeinoihin, jotka tasoittavat vaihtelua päivien ajalta ja pitkäaikaisiin kausivarastoihin, joiden on tarkoitus kerätä ylijäämälämpöä kesällä ja vapauttaa sitä talvella.

#### 4.3.1 Lyhytaikaiset varastointimenetelmät

Lyhytaikaisella varastoinnilla tasataan lämmön kulutusta vuorokauden aikana. Tämä on aurinkolämmitteisissä ratkaisuissa tärkeässä roolissa ja käytetään kaukolämmitysjärjestelmissä huippukuormien tasoittamisessa, jotta lämpökeskusten turhilta käynnistymisiltä vältytään. Tavallisin ratkaisu kotitalouksissa on vesivaraaja, joka varastoi ylimääräisen lämmön suuriin 150-3000 litran säiliöihin. Varaajan koon kasvattaminen pidentää aikaa, jonka rakennus voi olla ilman lämmön tuotantoa useampaan vuorokauteen asti, mutta myös hintaa ja energiamäärää, jonka lämmönvaraaja hukkaa lämpöhäviöinä. Kaukolämpöjärjestelmä käyttää myös vesivaraajia tuotannon optimointiin, mutta näiden kokoluokka on kymmeniä tuhansia kuutiometrejä. (Motiva 2020b; Mäkelä & Tuunanen 2015)

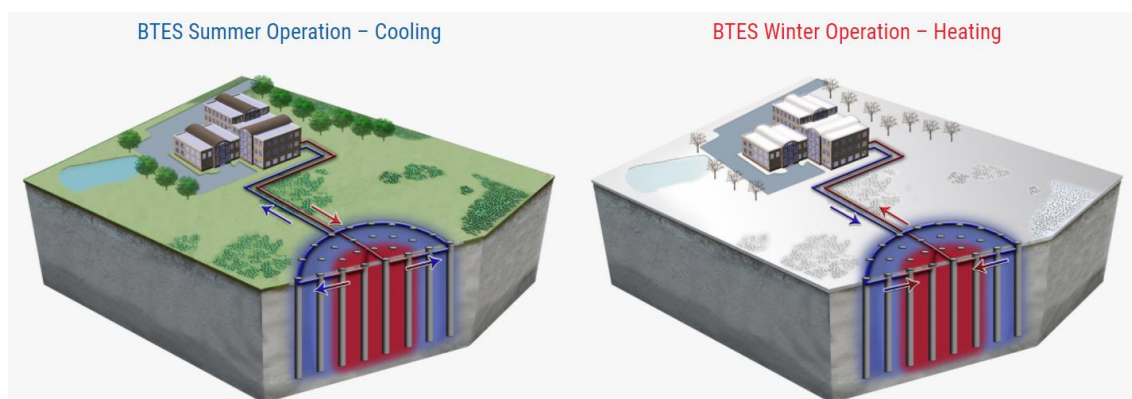
Rakennustasolla voivat talon rakenteet toimia väliaikaisina lämmön varastoina. Useimmissa rakennuksissa talon raskaat rakenteet kuten harkko, tiili, betoni ja niistä koostuvat välipohjat, pilarit ja seinät riittävät tasaamaan vuorokauden aikana tapahtuvia lämpötilan vaihteluja. Tehostettu muoto tästä on kivivaraaja, jossa lämmin ilma johdetaan 20–50 mm kokoisen kiviaineksen läpi varastoimaan lämpö viileisiin kiviin. Tarvittaessa lämpöä ilman virtausuunta käännetään ja viileä ilmavirta lämmitetään lämpimien kivien lomitse käyttöön. (Motiva 2020a)

#### 4.3.2 Kausivarastointi

Lämmön kausivarastointi mahdollistaa lämmön saannin tasaamisen vuoden kulutusvaiheluiden ajalle. Pienikokoiset lämpövarastot ovat fysikaalisesti vaikeasti toteutettavissa olevia, joten nykyiset kausivarastointitekniikat perustuvat erityyppisiin

suuriin maanalaisiin vesivarastoihin. Näissä varastoissa valtava koko on keskeinen etu. Vaikka varaston koon kasvattaminen myös kasvattaa pinta-alaa, josta lämpö karkaa, niin varaston tilavuus ja lämpökapasiteetti kasvaa nopeammin suhteessa pinta-alaan mitä suurempi sen koko on. Maanalaisia varastotyyppejä ovat porakaivokentät (BTES – Borehole Thermal Energy Storage), pohjavesivarantovarastot (ATES – Aquifer Thermal Energy Storage) ja kaivantovarastot (PTES – Pit Thermal Energy Storage). Kesäisin varastoihin pumpataan kiinteistöstä lämmintä vettä ja maasta saatavaa viileää vettä voidaan käyttää jäähdyttämiseen. Talvisin puolestaan kesän aikana maan alle pumpatulla lämpimällä vedellä voidaan pitää kiinteistö lämpimänä. (Motiva 2020a)

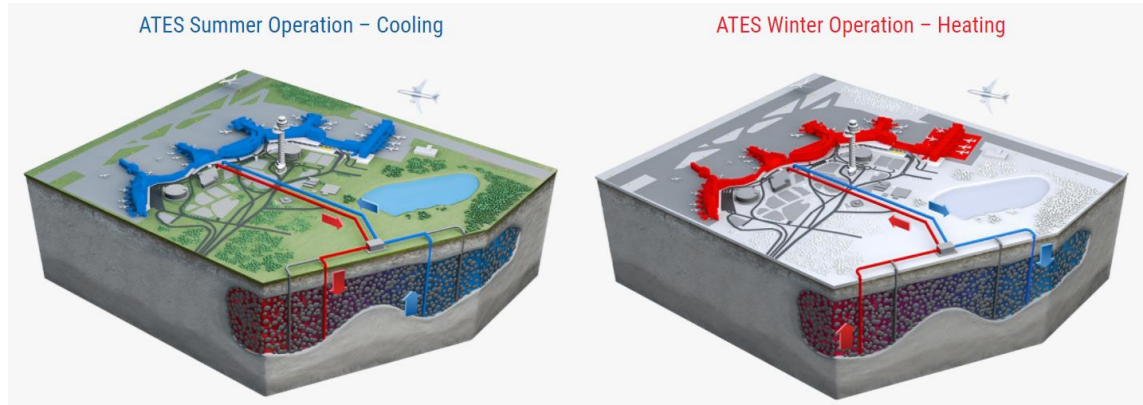
Porakaivokentät perustuvat sarjaan maahan porattuja kaivoja, joihin pumpataan vettä. Pääasiallisena lämmön varastona toimii kaivojen ympärillä oleva kiviaines, johon lämpö varastoidaan keskeltä ulos kuvan 14 mukaisesti. BTES on suljettu järjestelmä, joten lupia pohjaveden käsittelyyn ei välttämättä tarvita. (Underground Energy 2020a)



Kuva 14. Porakaivokentän toimintaperiaate kesän lataamisen aikana ja talven purkamisen aikana. (Underground Energy 2020a)

Pohjavesivarantovarastoissa lämpö varastoidaan suoraan pohjavesialueelle, josta on määritetty lämmin osuus ja viileä osuus, jonka rakenne on esitetty Kuvassa 15. Koska ATES tarvitsee vain muutaman kaivon otto- ja paluupisteeksi, on sen rakentaminen edullisempaa kuin BTES-varaston. ATES'in toimintaperiaatteena on pumpata lämmitettyä vettä suoraan pohjavesialueelle kesäisin, ja talvisin käyttää lämmintä pohjavettä lämmitykseen. ATES on kuitenkin avoin järjestelmä, ja käsittelee raakaa pohjavettä, joten

se usein tarvitsee luvat sen käsittelyyn, ja ongelmana voi olla maaperästä peräisin olevien kivennäisaineiden aiheuttama likaantuminen. (Underground Energy 2020b)



Kuva 15. Pohjavesivarantovaraston toimintaperiaate kesän lataamisen aikana ja talven purkamisen aikana. (Underground Energy 2020b)

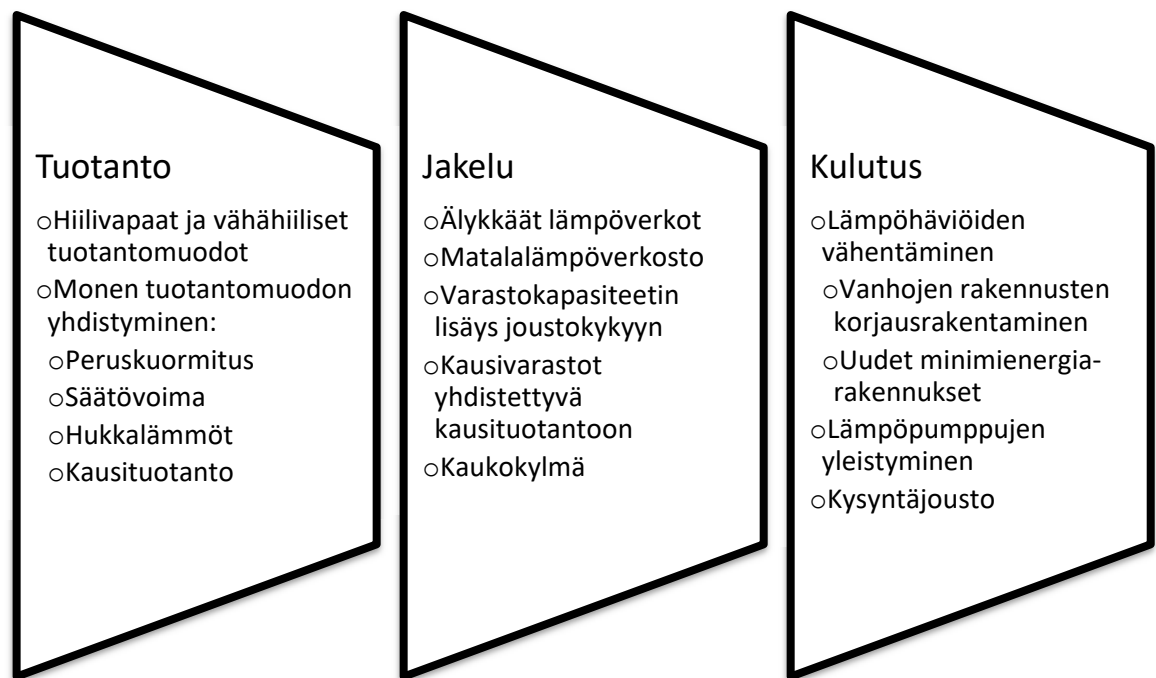
Kaivantovarastot ovat yksinkertaisimmillaan suuria puoliksi maanalaisia vesialtaita, jotka toimivat kuin suuri vesivaraaja. PTES-varastoja käytetään yleensä vain silloin, jos olosuhteet eivät mahdollista BTES- tai ATES-varastojen rakentamista. (Motiva 2020a)

## 5 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaukolämpöverkot tulevat olevaan tiukkenevien energiatehokkuusmääreiden kohteena, mutta myös tärkeässä roolissa energiatehokkaassa lämmityksessä. EU-tasolta lähtien energian tuotannossa ja -kulutuksessa pyritään nostamaan tehokkuutta ja hyödyntämään muuten hukkaan menevää energiaa ja hiilidioksidipäästöjä. Tulevaisuudessa polttoon pohjautuvat menetelmät tulevat mahdollisesti siirtymään pois ensin fossiilista polttoaineista, biopohjaisiin polttoaineisiin kuten puu hakkeeseen, ja sitten asteittain vaihtumaan lämpöpumppuihin, aurinkolämpöön, ydinvoimaan, yhdistettynä vesi- tai maalämpövarastoihin. Kaukolämpöverkon voi odottaa tulevan joustavammaksi niin tuotannon kuin kulutuksen puolella, varsinkin kun teollisuuden hukkalämpöjä integroidaan kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon joustavuuden nousu tulee pitkälti kasvavasta varastointikapasiteetista, joka sallii tuotantoon vaihtelevuutta, ja älykkäämmästä jakelujärjestelmästä, joka voi ottaa huomioon kysyntäjouston periaatteita kuluttajapuolella yhdessä tuotantojouston kanssa.

### 5.1 Miltä näyttää tulevaisuuden kaukolämpöverkko?

Kaukolämpöverkon kehitys tulee todennäköisesti heijastamaan sähköverkon kehitystä energialähteiden muutoksen, jakelun kehityksen ja kulutuksen tehostumisen suhteen. Tulevaisuuden kaukolämpöverkoissa tulee korostumaan vähähiilisyys ja energiatehokkuuden lisääntyminen jokaisessa vaiheessa kaukolämmön elinkaarta sen tuotannossa, jakelussa ja kulutuksessa, kuten Kuvassa 16 esitetty.



Kuva 16. Kaukolämmön osakokonaisuuksien tehostumisen ja uudistumisen mahdollisuudet

### 5.1.1 Tuotanto

Fossiilisiin polttoaineisiin ja turpeeseen perustuvat lämmön tuotanto ja yhteistuotanto ovat todennäköisesti lähitulevaisuudessa vähentymään hyvin nopeasti Suomen pyrkessä eroon fossiilista polttoaineista. Lyhyellä aikavälillä muut biopolttoaineet kuten puuhake voivat korvata lähtevää kapasiteettia, etenkin kun hiilen tai turpeen polttoon soveltuvat voimalat voidaan muuntaa näitä polttoaineita käyttäviksi.

Pidemmällä aikavälillä mahdollisesti myös biopolttoaineita aletaan karsimaan energiantuotannon siirtyessä enemmän pois polttopohjaisista ratkaisista. Kaukolämmön suhteen korvaavaa kapasiteettia saadaan mahdollisesti ydinvoimasta, etenkin kaupunki- tai kaupunginosatason SMR-reaktoreista, joilla voidaan kattaa lämmön peruskuorman. Lisävoimaa verkkoon toisi kausivarastoitu aurinkolämpö ja hukkalämpöjen kattava hyödyntäminen teollisuudesta, asumisesta ja esimerkiksi datakeskuksista. Kaukolämpöverkon ulkopuolinen lämmitys todennäköisesti hoituisi lämpöpumpuilla, jotka ovat vähäsähköinen vaihtoehto verrattuna sähköpattereihin ja huomattavasti energiatehokkaampia kuin polttokattilat.



Monipuoliset tuotantotavat ja joustava jakeluverkko myös nostavat kaukolämpöjärjestelmän luotettavuutta ja häiriönsietokykyä. Katkoksen tai häiriön tapahtuessa missä tahansa verkoston osassa voivat muut osat jatkaa normaalia toimintaa pidempään sisäisen jouston ansiosta ja saavat enemmän aikaa poikkeustilanteeseen varautumiseen tai prosessin turvalliseen alas ajamiseen.

### 5.1.2 Jakelu

Kaukolämpöjakeluverkon lämpötilan laskeminen nykyisestä n. 120/70 °C meno- ja paluu lämpötilasta esimerkiksi 50/20 °C lämpötilaan vähentää lämpöhäviöitä verkostossa ja mahdollistaa yhä laajemman hukkalämpöjen käyttöönoton lämmön tuotannossa. Pienempi lämpötila myös parantaa suhteellisesti lämpimämpien varastointikeinojen kapasiteettia.

Vaihtelevan kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisessa tulevat lämpövarastot olemaan tärkeässä roolissa. Tämä näkyy erityisesti joustamattomien energiantuotantomuotojen kuten ydinvoiman tai säästä riippuvaisen tuotantokeinon kuten aurinkolämmön tasapainottamisena. Lämpövarastojen purkamisen ja lataamisen sujuvan toiminnan onnistumiseksi olisivat ne todennäköisesti automatisoituja ja ehkä myös rajalliseen lämmityksen tarpeen ennustamiseen kykeneviä reaaliaikaisen kulutuksen, sääennusteen ja historiallisen vuorokausi/vuosikausirytmien perusteella.

### 5.1.3 Kulutus

Kuluttajapuolella jo nykytilanteessa on kaukolämmön otto verkosta pitkälle automatisoitu lämmönjakokeskusten avulla. Tämä voi tarkoittaa sitä, että matalampaan verkkolämpötilaan siirtyminen vaatii parhaassa tapauksessa vain uudelleenohjelmointia, jolloin kuluttajapuolella kaukolämpöverkon uusiutuminen ei suuresti vaadi uusimista. Huonossa tilanteessa voisi lämpötilan laskeminen verkossa johtaa siihen, että jotkin lämmönjakokeskukset ovat kykenemättömiä tehokkaasti hyödyntämään matalalämpöisempää vettä, jolloin vaadittaisiin suurempia uudistuksia.

Lämmönjakokeskukset yhdistettynä kuluttajapuolen lämpövarastoihin kuten lämminvesivaraajiin mahdollistavat rakennuskohtaisen kysyntäjouston lämmitykselle, ja vielä sellaisessa muodossa että asiakkaiden ei tarvitse muuttaa rutiinejaan siihen

osallistuakseen. Kannustimia kysyntäjoustoon osallistumiseen voi olla esimerkiksi hinnoittelun muuttaminen joko reaaliaikaisesti korkean kysynnän aikana, tai tilastopohjalta edullisemmaksi vähäisen kulutuksen kellonaikoina.

Matala- ja minimienergiatalojen rakentaminen ja vanhojen rakennusten korjausrakentaminen tulee kuluttajapuolella vähentämään kaukolämmönkulutusta. Vähentynyt kysyntä voidaan poistaa saastuttavimmista energiantuotantomuodoista, jolloin uudenlaisten energiantuotantomuotojen ei tarvitse täysimääräisesti korvata kaikkea vanhaa kapasiteettia. Myös tietyssä kohtaa energiatehokkuutta ei pienempien rakennusten ole enää taloudellisesti järkevää liittyä kaukolämpöverkkoon, jos rakennuksen lämmitystarpeen voi edullisemmin hoitaa lämpöpumpuilla. Näillä on myös omakotitalojen näkökulmasta etuna mahdollisuus jäähdytykseen kesäisin.

## 5.2 Pohdinta

Kaukolämpöön liittyvä julkinen keskustelu on varsin vähäistä verrattuna sähköenergian keskusteluun. Osasyitä tähän voi olla monia. Peruskouluissa energiantuotantoon liittyvä

opetus käsittelee energiantuotantoa usein vain sähkön muodossa ja kaukolämmön tuotanto mainitaan ohimennen, jos ollenkaan. Uusista ja uusiutuvista sähköntuotantomuodoista kuulee kuukausittain, mutta lämmöntuotannossa ei ole paljon julkista keskustelua kehityksen suhteen. Toisaalta sähköllä toimivien ja sähköä käsittelevien laitteiden monimutkaisuus on omiaan herättämään enemmän mielenkiintoa kuin lämpöverkon suhteellinen yksinkertaisuus.

Isoimpana osasyynä voi olla että Pohjois- ja Itä-Euroopan ulkopuolella kaukolämmitys ei ole kovin yleistä, lämpimämmän ilmaston tehdessä lämmityksestä aiheellisen vain pienen osan vuodesta. Näin ollen, jos julkinen keskustelu keskittyy tämänlaisista maista tulevaan kehitykseen, on ymmärrettävää, ettei kaukolämpö ole harkinnassa mukana.

Yhtenä syynä voi julkisen keskustelun vähäisyyteen olla kaukolämpöverkon toiminnan moitteettomuus. Kuten todettu, katkosten määrä kaukolämmön jakelussa on erittäin vähäinen, ja ilmeisesti lämmityksen kustannukset kaukolämpöä käyttäessä ovat sopusuhteessa havaittavaan hyötyyn nähden. Tätä voi verrata muussa infrastruktuurissa

esimerkiksi sähköverkoissa kärkeästä julkista keskustelua herättäneeseen siirtohinnoitteluun tai vähemmässä määrin verkko-operaattoreihin. Kaukolämmön myös ollessa luonnollinen monopoli valitusten määrä on siihen nähden hyvin alhainen. Toinen välttämätön infrastruktuuri, josta on käyty vähäistä julkista keskustelua, on vesi, mutta vesijohtoverkon häiriöt voivat olla korkean profiilin tapauksia kuten 2007 Nokian vesikiriisi. Juomaveden puhtauden pilaantuminen tai sen saannin heikkeneminen aiheuttavat akuutteja terveydellisiä haittoja, jolloin ongelmat vedenjakelussa näkyvät huomattavasti ja melkein välittömästi.

## 6 YHTEENVETO

Lämmöntuotanto kattaa huomattavan osan kaikesta primäärienergian kulutuksesta Suomessa, joten sen sääntely mitä tulee päästöihin ja energiatehokkuuteen tiukkenee jatkuvasti niin EU-tason säädöksillä kuin kansallisilla laeilla. Lämmöntuotannon ja kulutuksen tehokkuuteen liittyy myös olennaisesti jakelujärjestelmän ja kuluttajan energiankäytön tehokkuus. Esimerkkejä näihin vaikuttavista päätöksistä ovat energiatehokkuusdirektiivi, Suomen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma ja korjausrakentamista koskevat päätökset.

Kaukolämmön tuotantokeinot tulevat monipuolistumaan. Nykyhetkellä valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan polttoon perustuvilla menetelmillä sekä lämmön ja sähkön yhteistuotannolla. Polttoaineena voi olla fossiiliset polttoaineet tai biopohjaiset polttoaineet kuten metsäteollisuuden sivutuotteet. Tärkeimpiä lämmön ja sähkön yhteistuotannon tapoja ovat höyryturbiinit ja kaasuturbiinit. Puun kaasutus on yksi huomattava tapa jatkojalostaa biopolttoaineita tehokkaampien tuotantomenetelmien käyttöön. Kiinnostusta ovat herättäneet myös pienemmän ja modulaarisemmat pien-CHP tuotantomuodot. Tällaisia ovat kaasuturbiinitekniikkaan perustuvat mikroturbiinit ja lämpöä liikkeeksi muuntavat Stirling-moottorit.

Lämpöpumput tulevat olemaan keskeisessä roolissa hukkalämpöjen käyttöön valjastamisen suhteen. Yhteistä kaikilla lämpöpumpputyypeillä on lämpöenergian kerääminen viileämmästä aineesta ja sen siirtäminen kuumaan aineeseen, kuluttaen suhteellisesti pienen määrän energiaa omaan toimintaansa. Tämän ansioista voidaan hyödyntää matalamman lämpötilan hukkalämpöjä kaukolämmön tuotantoon. Yleisin lämpöpumpputyyppi on kompressorilämpöpumppu, joka käyttää paineen ja faasinmuutoksia toimintaansa. Muita tyyppejä ovat absorptiolämpöpumppu, jolla voidaan tuottaa myös kylmää ja höyryn energiantason nostamiseen keskittyvät termokompressorit ja mekaaninen komprimointi.

Ydinvoimaa voidaan myös käyttää lämmön lähteenä, mutta johtuen voimalaitosten sijoituksesta kauas asutuksesta ja koetuista turvallisuushaitoista jouduttaisiin lämpöenergiaa kuljettamaan hyvin pitkiä matkoja, jolloin se ei ole kaupallisesti

kannattavaa. Yhtenä ratkaisuna tähän on esitetty SMR-reaktorityyppejä, pieneksi skaalattuja ydinreaktoreita, joiden turvallisuusriskit ja kustannukset on modulaarisella suunnittelulla minimoitu. Pieni koko myös mahdollistaisi helpohkon logistiikan tuotantolaitoksen sijoittelulle paikallisen tarpeen mukaan ja reaktorin elinkaaren päätteeksi helpomman loppusijoituksen.

Auringon energiaa voidaan aurinkosähköpaneelien tapaa myös käyttää lämmitykseen. Aurinkolämpöjärjestelmissä käytetään auringon säteilyä joko kohdistetusti tai ilman kohdistusta lämmittämään keräisjärjestelmässä kiertävää väliainetta, joka pumpataan lämpövarastoon, jossa lämmitetään esimerkiksi käyttövettä. Kaukolämmön suhteen aurinkolämmön keruu vaatii rinnalleen kausivarastointia, lämmön huipputuotannon ja huippukulutuksen ollessa vastakkaisissa vuodenaajoissa.

Kaukolämpöjärjestelmän keskeisimpänä osakokonaisuutena voidaan pitää jakelujärjestelmää, joka yhdistää lämmön tuottajat sen kuluttajiin. Nykyinen kaukolämpöverkko koostuu parista meno- ja paluuviesiputkia, joiden koko vaihtelee pitkiä matkoja kulkevista siirtojohdoista korttelikohtaisiin runkojohtoihin, joista edelleen verkko liitetään asiakkaisiin talojohdoilla. Asiakkaalla olevat lämmönjakokeskukset huolehtivat automaattisesti siitä, kuinka paljon verkosta otetaan tehoa rakennuksen lämmitystarpeisiin nähden.

Kaukolämpöjärjestelmän voidaan odottaa kehittyvän tulevaisuudessa niin sanotuksi matalalämpöverkoksi. Verkossa kiertävän veden lämpötila on huomattavasti alempi tämänhetkisiin lämpöverkkoihin verrattuna, mikä vähentää lämmön vuotamista ympäristöön ja mahdollistaa matalamman lämpötilan lämmönlähteiden liittämisen kaukolämpöverkkoon.

Toisena tärkeänä kehityksen sarakkeena ovat myös kaukolämpöverkkoon liitettävä varastointikapasiteetti, joka lisää verkon joustavuutta ja edelleen mahdollistaa sellaisten lämmön talteenotto- ja tuotantomuotojen hyödyntämisen, jotka ovat esimerkiksi säästä riippuvaisia. Valtaosa suuren kokoluokan lämmön varastoista ovat vesi- tai maavarastoihin pohjautuvia. Tällaisia ovat esimerkiksi kiviaineeseen perustuva porakaivokenttä, pohjaveteen perustuva pohjavesivarantovarasto, ja keinotekoisesti tehty vedellä täytetty kaivantovarasto.

## LÄHDELUETTELO

All Power Labs, 2012. Wood gasification explained [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.allpowerlabs.com/gasification-explained> [viitattu: 31.5.2021].

Benhardt E., 2019. The Basics of a Thermocompressor [verkkodokumentti]. Kadant. Home, Blog, Auxiliary Steam Equipment, The Basics of a Thermocompressor. Saatavissa: <https://kadant.com/en/blog/auxiliary-steam-equipment/the-basics-of-a-thermocompressor> [viitattu: 1.2.2021].

Energiateollisuus, 2020. Kaukolämpötilasto 2019 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot> [viitattu: 17.12.2020]. 76 s.

Energiateollisuus, 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/439/Kaukolammon\\_kysyntajousto\\_loppuraportti\\_VALOR.pdf](https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf) [viitattu: 30.3.2020]. 32 s.

Euroopan komissio, 2020. Energy efficiency directive [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en) [viitattu: 17.12.2020].

Euroopan komissio, 2019. Komission suositus (EU) 2019/1659 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019H1659&from=EN> [viitattu: 17.12.2020].

Fortum, 2016. Fortum hyödyntää Soneran uuden datakeskuksen hukkalämmön kaukolämpönä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2016/10/fortum-hyodyntaa-soneran-uuden-datakeskuksen-hukkalammon-kaukolampona> [viitattu: 18.1.2021]. 19 s.

Hanania J., Stenhouse K., Yyelland B. & Donev J., 2018. Energy Education – Solar collector. [verkkodokumentti]. Calgary: University of Calgary. Saatavissa: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar\\_collector](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_collector) [viitattu: 16.2.2021].

Hautala M. & Peltonen H., 2016. Insinöörin (AMK) fysiikka – OSA I. 10. painos. Lahti: Lahden Teho-Opetus oy. 332 s.  
ISBN: 9789525191295

Hawken P., 2017. Drawdown – The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming. Lontoo: Penguin Books Ltd. 256 s. ISBN: 978-0143130444

Karjalainen T., 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. [verkkodokumentti] Oulun yliopisto, Kajaanin yliopistokeskus. Saatavissa:  
[https://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen\\_lammon\\_ja\\_sahkon\\_yhteistuotannon\\_tilannekatsaus\\_laitteet\\_ja\\_niiden\\_kayttoonotto.pdf](https://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen_lammon_ja_sahkon_yhteistuotannon_tilannekatsaus_laitteet_ja_niiden_kayttoonotto.pdf) [viitattu: 16.2.2021]. 30 s.

Koivuluoma J., 2018. CHP-voimalan käyttöönottoprosessin suunnittelu [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavissa:  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805148008> [viitattu: 16.2.2021]. 30 s.

Koljonen T. & Sipilä K., 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. [verkkodokumentti] Espoo: VTT. VTT tiedotteita – Meddelanden -Research Notes 1926. Saatavissa:  
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf> [viitattu: 1.2.2021]. 55 s.

Kärenlampi K., 2017. Höyrykattiloiden lämpötekniinen suunnittelu [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201704134770> [viitattu: 31.5.2021]. 79 s.

Laurila J. & Lauhanen R., 2011. Pienen kokoluokan CHP-teknologiasta lisää voimaa Etelä-Pohjanmaan metsäkeskusalueelle. [verkkodokumentti] Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Saatavissa:  
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33460/B53.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu: 1.2.2021]. 43 s.

Lindell M., 2011. Vertailussa 12-sarjan ilmalämpöpumput. [verkkodokumentti] Tekniikan Maaailma. Saatavissa: <https://rakennusmaailma.fi/vertailussa-12-sarjan-ilmalampopumput/> [viitattu: 1.2.2021].

Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F. & Mathiesen B. V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68(2014). 11 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089> [viitattu: 2.3.2021].

Luoranen J., 2017. Teollisen kokoluokan lämpöpumppukoneikon tekniikka ja talous. [verkkodokumentti]. Espoo: Aalto-yliopisto. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25107/master\\_Luoranen\\_Juho\\_2017.pdf?sequence=2](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25107/master_Luoranen_Juho_2017.pdf?sequence=2) [viitattu: 1.2.2021]. 110 s.

Maaskola I. & Kataikko M., 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/10217/Yljaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Lampopumppu\\_ja\\_ORC-sovellukset.pdf](https://www.motiva.fi/files/10217/Yljaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ja_ORC-sovellukset.pdf) [viitattu: 31.5.2021].

Motiva, 2020a. Ilmakeräimet [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/ilmakeraimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/ilmakeraimet) [viitattu: 16.2.2021].

Motiva, 2020b. Kausivarastointi [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/kausivarastointi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/kausivarastointi) [viitattu: 2.3.2021].

Motiva, 2014. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf) [viitattu: 1.2.2021].

Motiva, 2008. Lämmitysjärjestelmät, Ilmalämpöpumput [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/files/175/Ilmalampopumput.pdf> [viitattu: 16.2.2021].



Mäkelä V-M. & Tuunanen J., 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin Ammattikorkeakoulu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf> [viitattu: 2.3.2021]. 161 s.  
ISBN: 978-951-588-507-4

Pekkala J., 2018. Aurinkolämpö osana kaukolämpöjärjestelmää [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018091315107> [viitattu: 1.6.2021]. 103 s.

Suomen NEEAP-4 raportti, 2017. Suomen kansallinen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma NEEAP-4 [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/fi\\_neeap\\_2017\\_fi.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/fi_neeap_2017_fi.pdf) [viitattu: 30.3.2021]. 255 s.

Underground Energy, 2020a. BTES – Borehole Thermal Energy Storage. [verkkodokumentti] Home, Our Technology, BTES. Lancaster, MA, USA: Underground energy. Saatavilla: <https://underground-energy.com/our-technology/btes/> [viitattu 1.6.2021]

Underground Energy, 2020b. ATES – Aquifer Thermal Energy Storage. [verkkodokumentti] Home, Our Technology, ATES. Lancaster, MA, USA: Underground energy. Saatavilla: <https://underground-energy.com/our-technology/ates/> [viitattu 1.6.2021]

U.S. Energy Information Administration, 2020. Solar Explained – Solar thermal collectors. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-collectors.php> [viitattu: 16.2.2021].

Wheeler R., 2007. Alpha Stirling engine. Wikimedia Commons. Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha\\_Stirling.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha_Stirling.gif) [viitattu 1.6.2021]

World Nuclear Association, 2020. Small Nuclear Power Reactors. [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> [viitattu: 1.2.2021].

UNFCCC, 2015. Paris Agreement. [verkkodokumentti]. United Nations Climate Change. Saatavissa: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) [viitattu: 21.5.2021]. 27 s.

Ympäristöministeriö, 2020. Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020-2050, Suomi [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus\\_final\\_10-03-2020-242AE19E\\_F497\\_4A38\\_8DF2\\_95556530BA53-156573.pdf/37a549e9-b330-5f8c-d863-2e51f2e8239a/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus\\_final\\_10-03-2020-242AE19E\\_F497\\_4A38\\_8DF2\\_95556530BA53-156573.pdf?t=1603259873424](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus_final_10-03-2020-242AE19E_F497_4A38_8DF2_95556530BA53-156573.pdf/37a549e9-b330-5f8c-d863-2e51f2e8239a/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus_final_10-03-2020-242AE19E_F497_4A38_8DF2_95556530BA53-156573.pdf?t=1603259873424) [viitattu: 13.4.2021]. 82 s.